

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Das Versprechen der Wiederkehr

Die Geschichte des Vogelzugs ist die Geschichte eines Versprechens. Es ist das Versprechen der Wiederkehr.“ Mit diesen Worten beginnt der Dokumentarfilm „Nomaden der Lüfte“, der kürzlich in ganz Europa die Kinos füllte. Was er seinen begeisterten Zuschauern fast kommentarlos vorführte: Die Spezialisten des Langstreckenflugs stellen fast alles in den Schatten, was moderne Flugtechnik aufzubieten hat. Wer – wie etwa die Küstenseeschwalbe – jährlich 20 000 Kilometer weit fliegt, um seinen Nistplatz aufzusuchen, muss keinen Vergleich scheuen. Und eine 20 Gramm schwere Rauchschwalbe, die für ihren 6000-Kilometer-Flug nach Afrika vorab angespeckte 20 Gramm Fett verbrennt, bietet ein Wunder an Effizienz. Der Film zeigt dies mit atemberaubend schönen Aufnahmen – direkt aus der Flugperspektive der Vögel.

Die Teams des Regisseurs Jacques Perrin segelten im Cockpit von Ultraleichtflugzeugen mit den Zugvögeln durch die Lüfte – an der Spitze typischer Keilformationen. Die Vögel ließen es sich trotz des Heckpropellers auch nicht nehmen, gelegentlich sogar auf dem Vorderteil des Fluggerätes Platz zu nehmen – mit dem Taxi nach Afrika.



Bevor dies aber nun zum Werbetrailer für einen Naturfilm wird, hier ein Blick hinter die schönen Bilder. Aristoteles glaubte noch, dass Schwalben im Winter wie die Frösche in den Sümpfen versinken. Erst als Forscher begannen, Zugvögel zu beringen, verdichteten sich die Erkenntnisse über die transkontinentalen Wanderwege. Dass man heute präzise über Flugrouten und Navigationskunst von immer mehr, auch seltenen und schwer beobachtbaren Vögeln Bescheid weiß, verdankt sich der Satellitenortung der letzten Jahre. Mit abnehmendem Gewicht der Sender gelingt es nun auch, immer kleinere Vögel mit dieser Technik zu verfolgen. „Endlich kann die Forscherneugier lange Strecken mit den Vögeln mitwandern“, notieren die Max-Planck-Forscher Peter Berthold und Ulrich Querner (siehe Seite 52).

Nur bei kleinsten Vögeln, wie etwa dem zehn Gramm schweren Teichrohrsänger, versagt die Methode noch aus Gewichtsgründen. Da greifen die Forscher zu scheinbar atavistischen Tricks: Sie richten ein Fernrohr auf den Mond und notieren Standort und Zeiten sowie Richtung und Silhouettengröße der vor der Mondscheibe passierenden Vögel.

Dass nicht alle Vögel wieder zurückkehren, mehr noch, die Forscher oft gar einen dramatischen Schwund beobachteten, ist auch die Sorge der Ornithologen. Strommasten, Bejagung oder Pestizide an Rastplätzen oder im Winterquartier sind Ursachen für teils hohe Verluste. Über die Telemetrie haben Wissenschaftler wichtige Aufenthaltsgebiete entdeckt. Dort haben die Staaten Verhandlungen für gezielte Schutzmaßnahmen aufgenommen. Damit das Versprechen der Wiederkehr auch wirklich eine Chance hat.

FORSCHUNG AKTUELL

12 **Minimixer im Wassertropfen**
Medizintechnik macht Strömungen in fallenden Tropfen sichtbar

14 **Nachgehakt**
Gentest aus der Drogerie

16 **Wie Stechmücken die Ohren spitzen**
Nachweis eines Verstärkers im Hörorgan von Insekten

21 **Zerfall mit Fragezeichen**
Umstrittenes Ergebnis einer zehnjährigen Suche

23 **Keine Frage der Hautfarbe**
Zuverlässigere Ermittlung der Verträglichkeit von Medikamenten

25 **Bild des Monats**
Brutstätte junger Sterne

SPEKTROGRAMM

50 **Urin als Waffe • Quark-Sterne • Klappt das Magnetfeld um? • Ultraschall gegen Tumoren • Evolution ist männlich u.a.**

THEMEN

30 **Dicke Luft am Nordpol**
Mit Sternenlicht ließ sich erstmals die Luftverschmutzung in der Polarnacht messen

38 **Die Entstehung der Galaxis**
Wie Astronomen die Geschichte unseres Milchstraßensystems rekonstruieren

52 **TITELTHEMA**
Vogelzug
Ortung über Satelliten

62 **DNA-Chips**
bewältigen hunderttausend DNA-Tests gleichzeitig

70 **Mundgeruch**
Forscher kommen den Ursachen einer alten Plage auf die Spur

80 **Ein internetweites Betriebssystem**
Gemeinschaftliche Nutzung aller Computer der Welt

90 **Technoskop-Magazin**
Verkehr: Luftüberwachung gegen den Stau • Technogramm

TITELBILD:

Wie Vögel – hier Streifengänse – sich auf dem Zug verhalten, ist in vielem noch rätselhaft. Ornithologen erkunden die Zugstrecken über ganze Kontinente nun mit Hilfe kleiner Sender, deren Signale Satelliten empfangen.

Bild: Mathieu Simonet / Le Peuple Migrateur

TITELTHEMA: VOGELZUG

Prinzesschens Reisen nach Afrika

Seite 52

Dank kleiner Sender auf dem Rücken von Störchen verfolgen Ornithologen die Vögel auf ihrem Zug nach Afrika und zurück nun kontinuierlich über Satelliten. Zu den Routen und Flugleistungen vieler Vogelarten liefert die neue Technik grundlegende Erkenntnisse, die bereits in internationalen Schutzprogrammen umgesetzt werden.



UMWELT Seite 30

Dicke Luft am Nordpol

Im Frühling trübt oft ein Dunstschleier den Himmel über der Arktis. Sein Ursprung konnte nun geklärt werden, nachdem es gelungen ist, mit Sternenlicht die Luftverschmutzung auch während der Polarnacht zu messen.



ASTROPHYSIK Seite 38

Die Entstehung der Galaxis

Mit dem Spürsinn von Kriminologen erschließen Astrophysiker, wie sich unser Milchstraßensystem einst aus einer diffusen Gaswolke herausgebildet hat. Als wichtigstes Indiz dient ihnen die räumliche Verteilung der chemischen Elemente.



BIOCHIPS Seite 62

Das kleinste Großlabor der Welt

Man fertige einige zehntausend verschiedene DNA-Stückchen und klebe sie auf ein Glasplättchen. So beginnt – stark vereinfacht – die Bauanleitung für einen Biochip, der in kurzer Zeit Gen-Fehler aufspürt oder Nebenwirkungen eines neuen Medikaments abklärt.

REPORT Seite 98

Der Offene Himmel

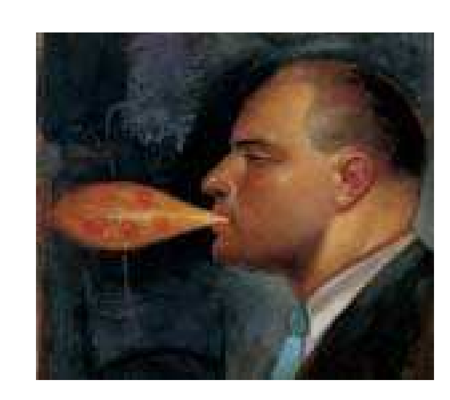
Die Gegner von einst dürfen sich nun gegenseitig in die Karten schauen: 29 Staaten haben ihren Luftraum für kooperative Beobachtungsflüge freigegeben. Die Kontrolle schafft militärische Transparenz und stärkt die Sicherheitspartnerschaft.



MUNDGERUCH Seite 70

Wenn der Atem nach Verwesung riecht

Seit Urzeiten haben Menschen schlechten Atem und versuchen, dem Übel mit allerlei wohlriechenden Kräutern beizukommen. Jetzt bringen Forscher frischen Wind in das anrüchige Gebiet.



INTERNET-COMPUTER Seite 80

Der Weltcomputer

PCs aller Welt, vereinigt euch! Schon in wenigen Jahren könnte diese Vision Realität werden – zum Wohle ihrer Benutzer und auf völlig kapitalistische Weise.



TECHNOSKOP-MAGAZIN Seite 90

Koteletts aus der Maschine

Es klingt fast wie ein Scherz: Deutsche Fleischbetriebe leiden unter hohen Personalkosten, gleichzeitig aber auch unter Fachkräftemangel. Die Lösung: Automaten, die Schwein und Rind zerlegen.

Außerdem:

➤ SmartKom: Mit Computern scherzt sich's schlecht

➤ Zahntechnik: Ergonomische Mundstücke für Berufstaucher



FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

98 **Stabilisieren statt Spionieren**
Der Offene Himmel – ein Durchbruch in der Sicherheitspolitik

100 **„Rüstungskontrolle, die in die Zukunft führt"**
Interview mit Oberst Ernst Britting

102 **Vertrauen und Flexibilität**
Der Nutzen des Offenen Himmels

105 **Spähen mit Gespür**
Hinschauen ja – Spionieren nein

107 **Ausgezeichnet**
Alfried-Krupp-Wissenschaftspreis und Award for Women in Science

REZENSIONEN

108 **Facing up** von Steven Weinberg
Dinosaurierjäger von Deborah Cadbury
Die sieben Töchter Evas von Bryan Sykes
Das Geheimnis des kürzesten Weges von Peter Gritzmann und René Brandenberg
Müll und Marmorsäulen von Günther E. Thüry

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

119 **Volltreffer im Bowling**

WEITERE RUBRIKEN

5 **Editorial**

10 **Leserbriefe**

11 **Impressum**

77 **Im Rückblick**

78 **Wissenschaft im Alltag**
Die Radarkontrolle

96 **Wissenschaft in Unternehmen**

111 **Preisrätsel**

115 **Wissenschaft im Internet**

122 **Stellenmarkt**
Lehre und Forschung

134 **Vorschau**

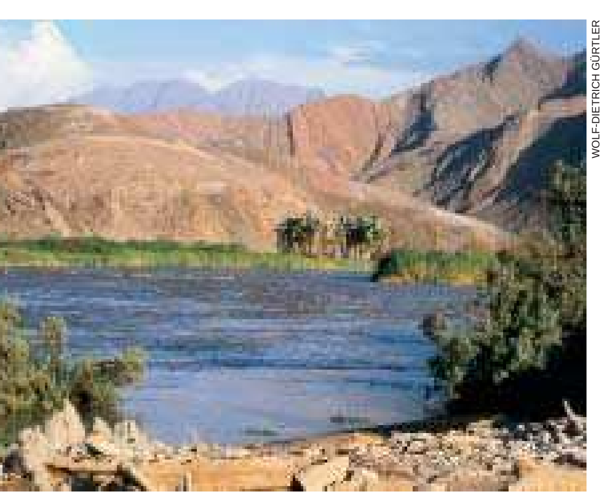
Ihr Wissenschafts-Portal: www.wissenschaft-online.de



Täglich Meldungen aus Wissenschaft, Forschung und Technik. Dazu Hintergrundinformationen, Software, Preisrätsel und Spektrum-Produkte. Ihr Spektrum-Magazin finden Sie wie immer unter **www.spektrum.de**

Die Himba und der große Damm – April 2002

Unbestritten sollten die Rechte und Interessen der Himba in der Diskussion bezüglich des Staudamms den Vorrang haben, doch letzten Endes geht es auch um die Balance eines fragilen Ökosystems. Der Wasserhaushalt im Untergrund kommuniziert mit der Wasserführung des Kunene. Fällt er unterhalb eines Staudamms – wo auch immer er entstehen mag – trocken, so sinkt der Grundwasserspiegel der Riviere (Trockenflüsse) in seinem Einzugsgebiet. Dieser „Wasserfaden" unter dem Rivier erhält den Leben spendenden Galeriewald, vor allem aus Kameldorn- und Anabäumen. Diese stehen an der Basis einer komplexen Nahrungspyramide, die nicht nur zahlreiche Pflanzenfresser wie Antilopen oder (Wüsten-)Elefanten, sondern auch Insekten, Vögel und Raubsäuger erhält. Im „trockenen" Zustand führen die Riviere Wasser unter der Oberfläche – oft so dicht, dass Elefanten oder Bergzebras erfolgreich mit den Füßen danach graben können. Diese sich mit Grundwasser füllenden Löcher stehen dann allen anderen Tieren ebenfalls zur Verfügung. Die Feuchtgebiete an der Kunenemündung, unverzichtbarer Rastplatz auch für europäische Zugvögel, stünden ebenfalls vor dem Aus. Der grüne Galeriewald an beiden Ufern bietet Nahrung, Wasser, Schutz und Schatten in einer mineralischen Welt. Es geht also um mehr als die Himba, was allein schon Argument genug sein sollte, nämlich um den Erhalt eines der letzten intakten und bisher weitgehend unbeeinflussten Lebensräume im südlichen Afrika!


WOLF-DIETRICH GÜRTLER

Erste Anbauversuche der Himba an Uferstreifen südlich der Baines Mountains

Ein Damm würde, egal wo, die empfindliche Grundwasserbalance und damit großflächig den Naturhaushalt eines der letzten „wilden" Landstriche Afrikas unwiderruflich zum Kippen bringen. Die Himba sind – noch – autarke, selbstständige Teile dieses Naturhaushaltes. Nach einem Dammbau sind sie, was Indianer oder Innuit seit langem sind: entwurzelte, dezimierte Almosenempfänger der westlich geprägten Zivilisation.

Wolf-Dietrich Gürtler, Zoologischer Leiter des Ruhr-Zoos, Gelsenkirchen

Gewinnen im Zahlenlotto

Mathematische Unterhaltungen – März 2002

Hier wird behauptet, dass, wenn ein Spieler alle Kombinationen auf einmal spielt, er einmal sechs Richtige „und, als Zugabe, sechsmal fünf Richtige, fünfzehnmal vier Richtige und so weiter", gewinnen würde. Das ist falsch! Im Zahlenlotto 6 aus 49 gilt: Wer alle möglichen Kombinationen auf einmal spielt, erzielt einmal sechs Richtige, 258-mal fünf Richtige, 13545-mal vier Richtige und 246820-mal drei Richtige.

Jan Mahmoudi, per E-Mail

Umweltpolitik – eine Sache von gestern?

Forschung und Gesellschaft – März 2002

Die Feststellung im Mainauer Gespräch „Die Deutschen interessieren sich nicht mehr für die Umwelt" hat mich zum Nachdenken über mögliche Ursachen einer solchen Haltung veranlasst. Ich sehe unser gesellschaftliches Umfeld von ökologischem Desinteresse durch Politik und Wirtschaft gekennzeichnet: Die Wirtschaft führt uns täglich einen großzügigen Umgang mit natürlichen Ressourcen vor Augen, indem Werbepost und Kaufangebote die vielfältigsten Bedürfnisse suggerieren. Fahrspaß sei das Wichtigste am neuen PKW und nicht ein geringer Kraftstoffverbrauch. Die Einführung eines Pfandes für Wegwerfdosen und -flaschen wird immer wieder verschoben. Und die so genannte Ökosteuer dient wegen der Verwendung dieser Gelder für den Wirtschaftsstandort Deutschland vor allem der Förderung steigender Produktion – also erhöhter CO_2-Emission.

Wenn ich mich als ökologisch verantwortungsvoller Bürger verhalte, dann verstoße ich permanent gegen die Regeln der Marktwirtschaft, die kostengünstiges Handeln verlangen. Hier nur einige Beispiele: Wenn ich weniger Elektroenergie verbrauche, verlangt das Energieunternehmen einen höheren kWh-Preis. Kaufe ich einen kleinen Diesel- statt Benzin-PKW, dann ahndet der Finanzminister die geringere CO_2-Emission mit der dreifachen Kfz-Steuer. Die Gesetze des Marktes legen mir eigentlich eine Entscheidung gegen die Ökologie nahe. So verwundert nicht die Feststellung „im persönlichen Umweltverhalten folgen Personen mit Umweltbewusstsein überwiegend einer low-cost-Strategie".

Ein Umdenken zu einer ökologisch handelnden Gesellschaft wird vermutlich erst erreicht werden können, wenn der Bürger merkt, dass auch die Wirtschaft gleichermaßen Opfer bringt. Hier sehe ich die Politik mit der Schaffung vernünftiger Regelungen in der Pflicht.

Klaus Schmidt, Mahlow

Errata

Die Himba und der große Damm – April 2002

Später soll das Kraftwerk eine Leistung von 360 Megawatt, nicht eine Energie von „360 MW pro Tag" liefern. In den Kudu-Erdgasfeldern vor Namibias Südküste vermutet man 560 Milliarden, nicht lediglich 560 000, Kubikmeter Erdgas.

Die Redaktion

Stellenanzeigen in „Spektrum"

Zu meinem großen Erstaunen versucht sich Spektrum der Wissenschaft jetzt auch als Arbeitsvermittler. Immerhin zwölf Seiten sind für einen sehr begrenzten Personenkreis reserviert. Den Ausführungen konnte man entnehmen, dass dies keine Einzelanzeige war. Glauben Sie, unbedingt der FAZ oder dem Arbeitsamt Konkurrenz machen zu müssen?

Harald Horneff, Griesheim

Alle Anzeigen, auch die Stellenanzeigen, helfen uns, den Preis für unsere Zeitschrift niedrig zu halten. Ein anzeigenfreies Spektrum-Magazin wäre etwa doppelt so teuer. Ein Weiteres kommt hinzu: Mehr Anzeigen im Heft bedeutet zumeist mehr redaktionelle Seiten! Und so erlauben uns auch die Stellenanzeigen, zusätzliche Seiten für wertvolle Themen einzuplanen.

Die Redaktion

Der Engpass – März 2002

Mangelndes Interesse

Ich habe lange keinen Artikel zu diesem brisanten Thema so intensiv studiert wie diesen. Hier wurde auf wenigen Seiten eine so große Fülle an Fakten dargestellt, dass man dem Autor Edward O. Wilson nur zustimmen kann. Wenn man diesen Artikel im Zusammenhang mit der Studie „Umweltpolitik – eine Sache von gestern?“ betrachtet, kann man eigentlich schon ersehen, dass nicht nur unsere Jugend, sondern auch die Erwachsenen eigentlich kaum ein Interesse an Problemen der gesamten Welt haben. Sie denken immer noch in ihrem kleinkarierten Rahmen. Hier sehe ich einen entscheidenden Ansatz, diese Themen in der vollen Wahrheit in unser Bildungssystem zu integrieren.

Dipl.-Ing. Uwe Wiegand, Apolda

Wie der Mensch das Denken lernte – April 2002

Ausdruck von Instinkten

Tattersalls These, dass „die Tür zum symbolischen Denken“ durch „die Erfindung der Sprache“ aufgestoßen wurde, setzt die Erklärung eines anderen, durchaus ungewöhnlichen Befunds voraus. Lautäußerungen von Säugetieren sind fast immer Ausdruck von „Instinkten“ oder von Emotionen, nicht aber von Kognitionen. Mögliche Ausnahmen bei nicht-menschlichen Säugetierarten, wie etwa die nach Klassen von Feinden differenzierten Warnschreie der Grünen Meerkatze, sind von äußerst geringer Zahl. Der Befund, dass die Lautäußerungen des Menschen mit seiner Kognition in Beziehung stehen, ist also alles andere als selbstverständlich. Insofern hängt Tattersalls These in der Luft. Für den Menschen ist es zwar auch charakteristisch, dass er über ein relativ „breites Spektrum an Lauten und Tönen verfügt“. Was ihn jedoch vor allen anderen Säugetieren auszeichnet, ist seine Fähigkeit, rasche rhythmische Folgen verschiedenartiger konsonantischer Schließ- und vokalischer Öffnungsbewegungen zu vollziehen. Dass Störungen des motorischen Sprachzentrums gerade diese Fähigkeit beeinträchtigen, weiß jeder Schlaganfallpatient mit entsprechenden Läsionen. So wichtig die Anatomie des Mund-Rachen-Raums sein mag, wichtiger für Erörterungen über die Sprachgenese sind neuroanatomische und neurophysiologische Befunde. 1960 hat der Sprachwissenschaftler Charles F. Hockett in „Scientific American“ einen einflussreichen Artikel veröffentlicht, aus dem immer wieder die Lehre gezogen wurde, dass es eine Erfindung der Sprache nicht gibt, dass es vielmehr die Evolution einzelner „Konstruktionsmerkmale“ der Sprache zu untersuchen gilt. Tattersall gehört zu den vielen Sprachursprungsforschern, die diese Forderung nicht mehr erreicht hat.

Prof. Udo L. Figge, Bochum

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 91 26-729

Menschwerdung: Code X

Spektrogramm – März 2002

Sie bringen hier eine Meldung aus „Science Express“ über angeblich spektakuläre Fundstücke mit x-förmigen Ritzzeichnungen und einem Alter von 77 000 Jahren in den Blombos-Höhlen Südafrikas. So interessant diese Funde auch sein mögen, so sensationell sind sie wiederum nicht.

In der „Steinrinne“ von Bilzingsleben am Nordrand des Thüringer Beckens sind schon vor 1990 um ein Mehrfaches ältere Knochengeräte mit geometrischen Ritzmustern gefunden worden. Dabei handelt es sich u. a. um ein doppeltes Rechteck in einem Fußwurzelknochen vom Waldelefanten sowie regelmäßige kamm- und strahlenförmige oder auch spitz zulaufende Ritzmuster auf anderen Knochengeräten. Prof. Dietrich Mania hat seinerzeit in verschiedenen Veröffentlichungen darüber berichtet. Schon die Vorläufer der Neandertaler haben demnach ähnliche kulturelle Leistungen vollbracht wie unsere mutmaßlichen südafrikanischen Vorfahren einige hunderttausend Jahre später. Unseren Respekt verdienen sie beide.

Dr. C. E. Leverkus, Hamburg



DIETRICH MANIA

Etwa 370 000 Jahre alt ist das Knochengerät von Bilzingsleben mit den regelmäßig eingravierten Linien.

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle, Christina Peiberg
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Andreas Merkert, Natalie Schäfer (stv. Herstellerin)
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-729
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (0 62 21) 91 26-770
Herstellung: Klaus Mohr, Tel. (0 62 21) 91 26-730
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Ulf Borgeest, Dr. Olaf Fritsche, Dr. Rainer Kayser, Matthias Weiß.

Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-600, Fax (0 62 21) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Marianne Blume, Tel. (0 62 21) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sfr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (02 11) 887-23 79, Fax (02 11) 887-23 99 verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-23 86, Fax (02 11) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 94, Fax (0 40) 33 90 90; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16-18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 88; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 87, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 23 ab 01.01.2002.
Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

© Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, D-69038 Heidelberg. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder in eine von Datenverarbeitungsmaschinen verwendbare Form oder Sprache übertragen oder übersetzt werden. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.
ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

FLUIDDYNAMIK

Minimixer im Wassertropfen

Physiker konnten nun erstmals das Strömungsmuster in einem fallenden Tropfen sichtbar machen. Dazu mussten sie ihn einige zehntausendmal identisch reproduzieren – ein kleines Kunststück für sich.

Von Song-I Han, Peter Blümler, Siegfried Stapf und Bernhard Blümich

Wassertropfen sind allgegenwärtig. Man kennt sie von leidigen, tropfenden Wasserhähnen und von nicht minder leidigem Regenwetter. Dennoch ist dieses alltägliche Phänomen weder trivial noch etwa wissenschaftlich lückenlos aufgeklärt. Beispielsweise zeigt ein fallender Tropfen eine komplexe Strömungsdynamik, die Physiker bis heute nicht völlig verstehen: Seine Grenzfläche wird durch ein vertracktes Zusammenspiel von Gravitations-, Auftriebs-, Reibungs- und Trägheitskraft ständig umgewälzt und erneuert. Zudem hängt die innere Dynamik eines frei fallenden Tropfens empfindlich davon ab, unter welchen Bedingungen er sich gebildet hat. All dies macht seine Physik zu einem analytisch nicht lösbaren Problem. Selbst moderne Hochleistungsrechner erlauben keine zufrieden stellende Simulation der internen Zirkulationsmuster.

Doch gilt der inneren Dynamik bewegter Tropfen keineswegs nur die Neugier der Grundlagenforscher – auch Ingenieure interessieren sich brennend dafür. So überführt man bei einer gängigen Methode der chemischen Stofftrennung eine gewünschte Substanz aus einer Lösung (zum Beispiel Wasser) in eine zweite, damit nicht mischbare Flüssigkeit (etwa Chloroform), indem man beide kräftig miteinander schüttelt. Die Effizienz dieser Flüssig-Flüssig-Extraktion hängt entscheidend von der Strömung innerhalb der vielen kleinen Tropfen ab, die sich beim Schütteln vorübergehend bilden.

Die Kenntnis der Tropfendynamik ist aber auch von großer Bedeutung bei der Herstellung von Tintenstrahldruckern, Sprays oder Emulsionen sowie beim Auswaschen von Schadstoffen wie Schwefeldioxid aus den Abgasen von Kraftwerken. Ebenso interessieren sich Atmosphärenforscher für die Physik des frei fallenden Regentropfens; denn dieser nimmt auf seinem Weg durch die Luft gleichfalls Schadstoffe auf, was zum berüchtigten sauren Regen führen kann.

Gewöhnlich untersuchen Wissenschaftler die Strömung in einem Tropfen mit eingebrachten winzigen Flittern, oder sie beleuchten ihn bei der stroboskopischen Fotografie mit einer Serie von Lichtblitzen. Die Ergebnisse solcher Messungen müssen jedoch mit Modellrechnungen kombiniert werden, um quantitative Aussagen zu liefern. Außerdem können eingebrachte Partikel das Bild verfälschen, indem sie gerade den oberflächensensitiven Stofftransport im Tropfen drastisch verändern.

Tatsächlich gibt es jedoch eine Methode, mit der sich selbst in undurchsichtigen Medien Strömungsfelder direkt abbilden lassen – und das berührungs- und zerstörungsfrei. Es handelt sich um die so genannte kernmagnetische Resonanz oder NMR (nach englisch *nuclear magnetic resonance*). Sie ist bisher vor allem aus der Medizin bekannt – als bildgebendes Verfahren, das im Gegensatz zum Röntgen keine Strahlenbelastung mit sich bringt.

Mit NMR-Methoden kann man aber nicht nur in einen Körper „hineinschauen", sondern auch Geschwindigkeiten und Beschleunigungen abbilden. Dazu muss man einem starken, gleichförmigen Magnetfeld nur schwächere, variable Zusatzfelder überlagern und deren Stärke und Dauer geschickt variieren. Allerdings brauchen solche Messungen Zeit. In einem horizontalen Querschnitt eines Wassertropfens an jeder Stelle die vertikale Geschwindigkeitskomponente zu bestimmen, würde rund fünf Stunden dauern. Wenn der Tropfen mit einer Geschwindigkeit von zwei Metern pro Sekunde fällt, bleibt er aber nur etwa zehn Millisekunden innerhalb des Messbereichs von vielleicht zwanzig Millimetern.

Dennoch ist es uns jetzt erstmals gelungen, per NMR-Technik die internen

Ein Bild aus tausenden Schnappschüssen

SONG-I HAN





Wassertropfen aus verschiedenen Messreihen



Seifenwassertropfen

Da die Messzeit für die Abbildung eines einzelnen fallenden Tropfens mittels kernmagnetischer Resonanz (NMR) zu kurz ist, wurde aus Messungen an 33800 verschiedenen, in Form und Dynamik aber identischen Tropfen ein synthetisches NMR-Bild zusammengesetzt. Bei reinem Wasser variiert die Form des Tropfens bei zwei unterschiedlichen Messreihen leicht (oben links und Mitte), bei Seifenlösung (oben rechts) nicht. Das liegt an der unterschiedlichen Oberflächenspannung der beiden Flüssigkeiten. Die „genoppte" Oberflächentextur ist ein Artefakt, das sich durch die Rekonstruktion der Bilder aus Messungen an Einzeltropfen ergibt.

Durch eine Variante der NMR-Bildgebung konnten auch die örtlichen Geschwindigkeitsvektoren (Pfeile) in einem Längsschnitt durch einen fallenden Tropfen (blau) bestimmt werden. Deutlich erkennt man ein Wirbelpaar mit großem „Auge", das für eine starke Durchmischung sorgt. Der Knotenpunkt oberhalb der Bildmitte rührt von einer Oszillation des gesamten Tropfens nach seinem Abreißen von der Pipette her, die zum Zeitpunkt der Messung noch nicht abgeklungen war.

Strömungsmuster im Tropfen

SONG-I HAN

Zirkulations- und Konvektionsmuster in einem Wassertropfen während des freien Falls quantitativ zu ermitteln und direkt sichtbar zu machen. Wir umgingen das Zeitproblem mit einem verwegenen Trick: Da eine Messung allein noch kein Bild liefert, machten wir eben viele nacheinander.

Dazu mussten wir freilich dafür sorgen, dass jeder Tropfen seinem Vorgänger aufs Haar gleicht und jeweils genau in derselben Fallhöhe vermessen wird. Die verschiedenen Tropfen erscheinen dann für das Gerät wie ein einziger, der quasi beim Fallen in der Luft angehalten wurde. Wegen der identischen Fallhöhe ist auch das interne Strömungsmuster im Moment der Messung jeweils praktisch dasselbe. Bei unseren Experimenten betrug die Abweichung zwischen den Einzeltropfen innerhalb einer Serie von Messungen weniger als 0,1 Prozent. Dies erfüllte in hohem Maße die Forderung nach genauer Reproduzierbarkeit.

Verschieden und doch gleich

Die Tropfen erzeugten wir mit einer Glaspipette. Damit sich jeweils ein gleich großes Exemplar in identischen Abständen (einmal pro Sekunde) von der Spitze ablöste, regelten wir mit einer Hochpräzisionspumpe eine konstante Füllhöhe der Pipette ein. Um den Tropfen vor Luftströmungen zu schützen, ließen wir ihn nach dem Abreißen durch ein Glasrohr fallen, das exakt vertikal in einem supraleitenden Magneten angebracht war. An einer bestimmten Stelle löste ein Paar Infrarot-Fotosensoren die Messung mit dem NMR-Spektrometer aus.

Diese Stelle galt es günstig zu wählen: Einerseits befindet sich der Tropfen nach einer längeren Fallstrecke näher an einem Zustand, in dem er nicht mehr beschleunigt wird und eine stabile Form sowie ein stationäres Strömungsmuster erreicht hat. Andererseits ist seine Geschwindigkeit dann vielleicht schon zu hoch für die NMR-Messung. Als Kompromiss wählten wir eine Fallgeschwindigkeit von etwa zwei Metern pro Sekunde, was einer Verweilzeit von zehn Millisekunden im Messbereich entspricht. Als Flüssigkeit verwendeten wir sowohl reines Wasser als auch eine Seifenlösung (mit 2,8 Prozent Betain).

Für eine einzige Aufnahme maßen wir eine Serie von knapp 34 000 Einzeltropfen. Bei einem Teil dieser Messungen bestimmten wir einfach die Anzahl der Wassermoleküle pro Volumenelement. Daraus ergab sich ein normales dreidimensionales NMR-Bild, das wie ein gewöhnlicher Kameraschnappschuss die äußere Gestalt des aus den tausenden



Alltäglich, doch für Physiker noch mit vielen Rätseln behaftet: fallende Wassertropfen

Einzelmessungen rekonstruierten Tropfens zeigte. Für ein so schnell fallendes Objekt ist die Qualität der Aufnahmen beeindruckend.

Schon bei diesen einfachen Bildern zeigte sich ein interessanter Unterschied zwischen Tropfen aus reinem Wasser und solchen aus Seifenlösung. Erstere hatten, wenn wir zwischen zwei Messreihen die Pipette entnahmen, reinigten und frisch einjustierten, anschließend meist eine etwas andere Form und damit auch eine andere innere Dynamik. Der Grund dafür ist offensichtlich die sehr hohe Oberflächenspannung von reinem Wasser gegenüber Glas. Dadurch reagiert der Tropfen empfindlich auf kleinste Schwankungen der Bedingungen im Moment seines Abschnürens von der Pipettenspitze, zumal diese nicht „unendlich“ spitz und absolut gerade und die Pipette selbst nicht perfekt oberflächenrein ist. Bei Seifenlösungen mit ihrer viel geringeren Oberflächenspannung dagegen hatten diese Faktoren so gut wie keinen Einfluss.

Unser Hauptinteresse aber galt natürlich NMR-Bildern, die Informationen über die Geschwindigkeit enthalten. Um sie zu gewinnen, maßen wir in einem zweiten Datensatz innerhalb einer Aufnahmenserie statt der Wasserdichte die Geschwindigkeitskomponente in einer Richtung – beispielsweise in der Vertikalen (pro Messung lässt sich jeweils nur ein Parameter bestimmen). Von der vertikalen Komponente wurde dabei die Fallgeschwindigkeit subtrahiert, um nur die interne Bewegung zu erhalten.

Diese Bilder lieferten erste interessante Aufschlüsse über die Tropfendynamik. So machten sie deutlich, dass Tropfen aus reinem Wasser in Fallrichtung um eine Größenordnung intensiver durchmischt werden als durch die allgegenwärtige brownsche Molekularbewegung. Der vertikale Stofftransport ist somit rund ▶

zehnmal so schnell wie im ruhenden Zustand. Das gilt allerdings nicht für Seifentropfen. Sie verhalten sich nahezu starr und werden durch das Fallen auch in vertikaler Richtung nur unwesentlich stärker durchmischt als auf Grund der brownschen Bewegung.

Schließlich gelang es uns in einer dritten Stufe, das Strömungsmuster im Tropfeninneren auch zweidimensional abzubilden. Dazu addierten wir in einem zweidimensionalen Längsschnitt durch den fallenden Tropfen (entlang der *z*- und der *x*-Achse) Punkt für Punkt die vertikale *z*- und die horizontale *x*-Komponente des Geschwindigkeitsvektors, die wir in gesonderten Messungen erhalten hatten. Aus diesen Daten konstruierten wir dann ein Bild, das die interne Dynamik im Wassertropfen anhand von Pfeilen veranschaulicht. Deutlich ist darin ein stabiles Paar von Wirbeln (so genannte Konvektionsrollen) mit intensiver Strömung und jeweils einem „Auge" zu erkennen.

Durch das Fallen bildet sich im Tropfen also ein Zirkulationssystem, das wie eine Art Miniaturmixer wirkt. Damit bestätigt sich die alte Vermutung, dass die Fallbewegung den Stoffübergang an der Oberfläche erheblich beschleunigt. Regen „reinigt" die Luft demnach sehr viel besser, als es die schwebenden Wassertropfen in einer Wolke tun.

Erstmals haben wir mit unseren Experimenten demonstriert, welche Möglichkeiten die NMR-Technik bietet, um die komplizierten, dreidimensionalen Strömungsmuster im Inneren eines fallenden Tropfens zu erforschen. Mit dem NMR-Verfahren lassen sich aber noch viele andere Parameter ermitteln. So wäre es denkbar, in einer zusätzlichen Dimension eine chemische Kenngröße abzufragen. Letztlich könnte es so gelingen, auch das räumliche Fortschreiten von (relativ langsamen) Reaktionen abzubilden, ohne in das System einzugreifen. Die Methode eröffnet also ein weites Spektrum von Möglichkeiten. ■

Song-I Han *hat unter Anleitung von* ***Prof. Dr. Bernhard Blümich*** *am Institut für Technische und Makromolekulare Chemie der RWTH Aachen unter anderem über das Thema dieses Artikels promoviert. Am selben Institut koordiniert* ***Dr. Siegfried Stapf*** *als Habilitand einen Sonderforschungsbereich, der sich mit Stoffübergängen zwischen nicht mischbaren Flüssigkeiten beschäftigt.* ***Dr. Peter Blümler*** *hat Teilprojekte dieses Vorhabens initiiert und leitet derzeit am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz das Projekt NMR-Bildgebung und -Spektroskopie.*

Nachgehakt

Geschäfte mit Gentests aus der Drogerie

Rund drei Milliarden DNA-Buchstaben machen das menschliche Genom aus. Wenn Sie Ihr Erbgut im Schnelltest mit dem irgendeines anderen Menschen – gleich welchen geografischen Ursprungs – vergleichen könnten, würden Sie eine Übereinstimmung von mehr als 99,9 Prozent feststellen. Zufallsmutationen, wie sie als Kopierfehler bei jeder Zellteilung vorkommen können, liegen im Wahrscheinlichkeitsbereich von einem Millionstel und sind somit praktisch vernachlässigbar.

Der Löwenanteil von jenem Zehntelprozent, das uns Menschen zu genetisch einzigartigen Individuen macht, geht auf das Konto der so genannten SNPs, auch Snips („Schnipsel") genannt. SNP steht für *single nucleotide polymorphism*, was schlicht bedeutet, dass für diese besondere Stelle im DNA-Text die Wahrscheinlichkeit, einen von der Mehrheitsversion abweichenden Buchstaben zu finden, ungewöhnlich hoch ist: Sie liegt im Bereich von einigen Prozent statt nur wenigen Millionsteln.

Auf Snips – oder Kombinationen davon – beruhen die meisten erblich bedingten Dispositionen für bestimmte Krankheiten (wie Brustkrebs, Diabetes oder Alzheimer-Syndrom) sowie die Unterschiede in der Wirksamkeit von Medikamenten bei verschiedenen Patienten (siehe Seite 23 und 62). Deshalb haben Genomforscher und Pharma-industrie ein besonderes Auge darauf geworfen. Gelänge es, die Rolle aller menschlichen Snips im Stoffwechsel aufzuklären, ließen sich Gesundheitsrisiken und Unverträglichkeiten für jeden Einzelnen genau vorhersagen.

Wer wäre nicht an solchen Informationen interessiert? Das hat sich nun die britische Firma Sciona zu Nutze gemacht, die übers Internet und durch einige Filialen der Handelskette „Body Shop" einen Erbgut-Test vertreibt. Käufer sollen einen Abrieb aus der Mundhöhle sowie einen ausgefüllten Fragebogen über ihre Lebensgewohnheiten einsenden. Sciona wertet die Daten aus und gibt dann individuell angepasste Gesundheitsratschläge.

Britische Genetiker (einschließlich einiger Experten, mit deren Namen Sciona wirbt) halten den Test allerdings für eine unverantwortliche und gefährliche Mogelpackung. Schließlich ist die Rolle der meisten Snips noch völlig unklar, und in vielen Fällen dürften hinter erblichen Krankheitsanfälligkeiten komplizierte Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Erbfaktoren stecken. Außerdem pickt der Test nur neun Gene heraus, von denen man aus Untersuchungen über Berufskrankheiten weiß, dass abweichende Versionen gewisse Risiken bergen. Auf sechs davon sind Enzyme verschlüsselt, die der Beseitigung von Giftstoffen dienen. Der Rest hat mit dem Abbau von freien Radikalen, des Vitamins Folsäure und von Alkohol zu tun.

Test-Teilnehmer, die von einem dieser Gene die nicht optimale Version besitzen, erhalten von Sciona Gesundheitsratschläge der Art, wie sie uns allen sowieso vertraut sind: Esst weniger geräuchertes Fleisch und stattdessen mehr Gemüse, trinkt Alkohol nur in Maßen. Wer den Risikofaktor nicht hat, bekommt die Auskunft, dass er zwar nicht besonders gefährdet ist, aber die erwähnten Maßregeln am besten trotzdem befolgen sollte. Im Wesentlichen zahlt man umgerechnet fast 200 Euro für Ratschläge, die der Hausarzt auch umsonst gibt.

Kritik richtet sich aber auch gegen die Dinge, die Sciona verschweigt. Einige der untersuchten Genvarianten werden mit erhöhten Krebsrisiken in Verbindung gebracht, doch den Testkäufern bleiben diese Hiobsbotschaften erspart. Dass solche Informationen auch in die falschen Hände gelangen und dem Kunden Schwierigkeiten mit Arbeitgebern oder Versicherungen bereiten könnten, hat man bisher unter den Teppich gekehrt.

Insgesamt sind sich wohl die meisten Experten einig, dass der gegenwärtige Kenntnisstand über Snips (ganz zu schweigen von der kümmerlichen Auswahl von nur neun Genen) für einen aussagekräftigen Erbgut-Check auf Erkrankungsrisiken keinesfalls ausreicht. Und wenn solche Tests einmal wirklich ein umfassendes, zuverlässiges Bild liefern würden, wäre ihr Vertrieb über den Laden um die Ecke ganz sicher nicht geeignet, Bedenken über den Datenschutz und die gen-ethischen Implikationen zu zerstreuen.

Michael Groß
www.michaelgross.co.uk

WAHRNEHMUNG

Wie Stechmücken die Ohren spitzen

Wie die Wirbeltiere verbessern auch Stechmücken mit selbst erzeugten Vibrationen im Hörorgan die Empfindlichkeit und Feinabstimmung ihres Gehörs. Dadurch können Männchen gezielt das leise Summen arteigener Weibchen wahrnehmen.

Von Martin Göpfert und Daniel Robert

Das menschliche Ohr ist in der Lage, durch Schall ausgelöste mechanische Schwingungen mit Amplituden von nur wenigen Nanometern (milliardstel Metern) zu registrieren und dabei noch feinste Nuancen in der Tonhöhe aufzulösen. Dies verdanken wir – ebenso wie andere Wirbeltiere – einem der wohl faszinierendsten Hör-Mechanismen: aktiver Schwingungsverstärkung.

Sie basiert auf Bewegungen der Haarzellen im Innenohr, den „auditorischen Rezeptorzellen“. Diese wandeln, wie üblich, externe Reize in elektrische Nervenimpulse um. Zugleich reagieren sie aber auch mechanisch: Sobald Schall im Innenohr Schwingungen auslöst, beginnen die Haarzellen sich aktiv zu bewegen und verstärken so die extern verursachten Vibrationen – ähnlich wie das Anstoßen einer Schaukel deren Pendeln unterstützt.

So kommt es zu einer positiven Rückkopplung, welche die Resonanzen im Innenohr verschärft. Ein interessanter Nebeneffekt dieser Schwingungsverstärkung sind so genannte otoakustische Emissionen: durch Bewegungen der Haarzellen im Innenohr erzeugte Töne, die sich gelegentlich im äußeren Gehörgang nachweisen lassen. Wirbeltierohren können also Schall nicht nur registrieren, sondern auch selbst produzieren!

Hochempfindliches, fein abgestimmtes Hören ist aber nicht nur für Wirbeltiere vorteilhaft. Auch einige Insekten nutzen es. Unsere jüngsten Untersuchungen an Stechmücken belegen dies anschaulich. Zudem haben sie gezeigt, dass die Blutsauger wie Wirbeltiere einen aktiven Schwingungsverstärker entwickelt haben, der die Empfindlichkeit und Abstimmung ihrer Hörorgane verbessert. Diese Parallelen sind erstaunlich, zumal Stechmücken statt mit Haarzellen mit mehrzelligen, mechanisch reizbaren Streckrezeptoren hören. Diese scheinen gleichfalls in der Lage zu sein, aktiv Bewegungen zu erzeugen und dadurch Schall-induzierte Schwingungen zu verstärken.

Stechmücken sind nachtaktiv, wie wohl jeder Leser aus eigener leidvoller Erfahrung weiß. Um sich fortzupflanzen, müssen die Männchen daher im Dunkeln arteigene Weibchen erkennen und finden können. Dabei verlassen sie sich auf ihr Gehör; mit ihm orten sie das leise Summen, das Stechmücken durch ihren Flügelschlag produzieren. Weibchen verschiedener Arten summen mit unterschiedlicher Frequenz und stets tiefer als die Männchen. Letztere können somit potenzielle Geschlechtspartnerinnen anhand der Höhe der Flugtöne eindeutig identifizieren und aufspüren.

Stechmücken-Männchen hören mit ihren Antennen. Deren stark verlängerter externer Teil – die Geißel – ist behaart und erinnert an einen Tannenbaum. Sie wird durch akustische Signale zum Schwingen angeregt und übersetzt so Schall in mechanische Bewegungen. Dabei zeichnet sie sich durch einige bemerkenswerte Eigenschaften aus. So zeigen Untersuchungen mit einem optischen Bewegungsdetektor (Laser-Doppler-Vibrometer), dass nur Töne bestimmter Frequenzen die Geißel vibrieren lassen. Sie ist genau auf denjenigen Frequenzbereich resonant abgestimmt, in dem arteigene Weibchen summen. Damit wirkt sie wie ein Filter, der Töne interessanter Frequenzen durchlässt, andere jedoch nicht.

Antennen fühlen Schwingungen

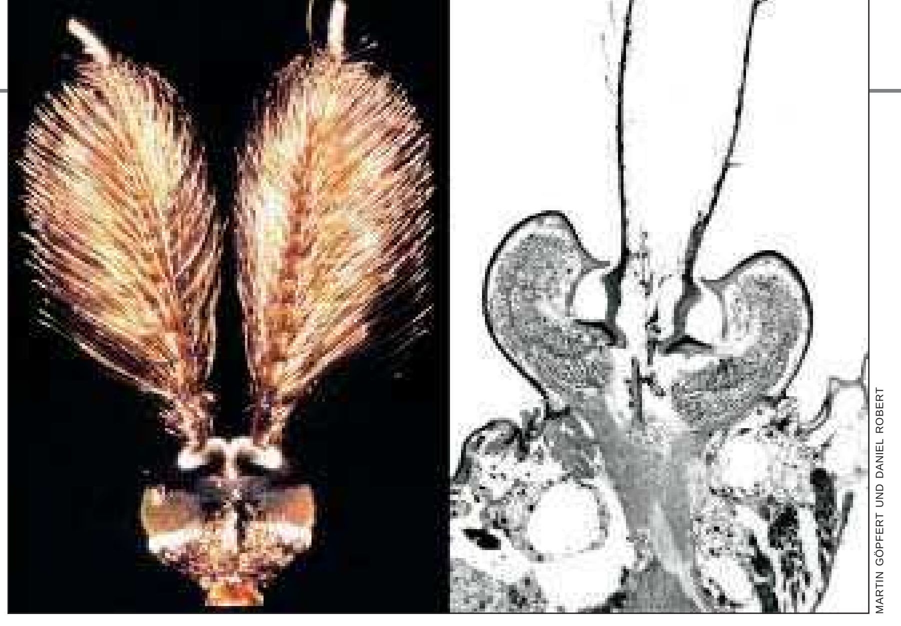
Fein abgestimmtes Hören zeigt sich bei Stechmücken folglich bereits in der Mechanik des Schallempfängers. Entsprechendes gilt für die Empfindlichkeit. Die durch Schall induzierten Geißelschwingungen sind unerwartet groß und übertreffen die Oszillationen der Luftpartikel im Schallfeld um ein Vielfaches. Eine wichtige Rolle spielen dabei offenbar die Geißelhaare. Sie geben die Kräfte, die bei Beschallung auf sie wirken, effizient an die Geißel weiter, da sie steif an diese angekoppelt sind. Dadurch vergrößern sie die dem Schall ausgesetzte Oberfläche und erhöhen folglich die mechanische Empfindlichkeit.

Wird die Antennengeißel in Vibration versetzt, schwingt sie wie ein steifer Stab um ihre Basis hin und her. Dort befindet sich der eigentliche Sitz des Gehörs, das „Johnston'sche Organ". Es umfasst zahlreiche Streckrezeptoreinheiten, die ringförmig um die Antennenbasis angeordnet sind, Geißelbewegungen registrieren und diese schließlich in elektrische Impulse umwandeln. Verblüffend sind sowohl die Komplexität als auch die Empfindlichkeit dieses Organs. Mit ungefähr 15 000 Rezeptorzellen ist es das komplexeste mechanosensitive Sinnessystem bei Insekten überhaupt. Es kann in seiner Komplexität sogar mit der menschlichen Cochlea (Hörschnecke) konkurrieren, welche über rund 16 000 Rezeptorzellen verfügt.

Die Streckrezeptoren des Johnston'schen Organs sind zudem extrem empfindlich. Sie reagieren bereits, wenn die Geißel so leisen Tönen ausgesetzt wird, dass sich ihre Spitze um lediglich sieben Nanometer hin- und herbewegt. Das entspricht einer Winkelauslenkung um ein zehntausendstel Grad oder – auf den Eiffelturm umgerechnet – einem Pendeln der Spitze um nur 0,7 Millimeter.

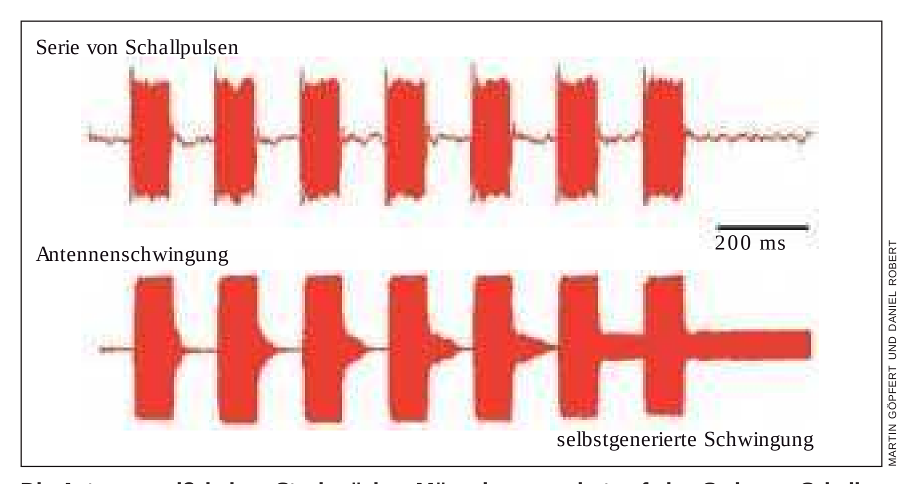
Als wir das Schwingungsverhalten der Antennengeißel genauer untersuchten, stießen wir auf ein interessantes Phänomen. Bei einigen Mücken war die bereits erwähnte Resonanzschwingung von einer zusätzlichen, scharfen Schwingung überlagert, die sich nicht auf die akustischen Reize oder mögliche Hintergrundgeräusche zurückführen ließ. Ihre genaue Position variierte von Tier zu Tier und hing von der individuellen Resonanzfrequenz der Antennengeißel ab. Demnach führt die Geißel selbstständig mechanische Schwingungen aus.

Das konnten wir auch direkt beobachten, als wir Stechmücken mit kurzen ▶



MARTIN GÖPFERT UND DANIEL ROBERT

Die behaarten Antennengeißeln von Stechmücken-Männchen dienen als Schallaufnehmer. Eigentlicher Sitz des Gehörs ist das Johnston'sche Organ in der Antennenbasis. In dem histologischen Längsschnitt (rechts) erkennt man die ringförmig darin angeordneten Streckrezeptoren. Sie wandeln Bewegungen der Geißel in elektrische Impulse um. Umgekehrt können sie die Geißel jedoch auch in Schwingungen versetzen.



MARTIN GÖPFERT UND DANIEL ROBERT

Die Antennengeißel eines Stechmücken-Männchens reagiert auf eine Serie von Schallpulsen (obere Spur) jeweils mit Vibrationen (untere Spur). Diese klingen von Puls zu Puls immer langsamer ab. Nach dem siebten Puls vibriert die Geißel schließlich von selbst: Sie wird von den Sinneszellen an ihrer Basis angetrieben. Durch diese selbstgenerierten Schwingungen erhöht sich die Empfindlichkeit und Abstimmung des Gehörs.

Tonpulsen beschallten. Diese versetzten die Geißeln, wie erwartet, in Schwingungen. Die Vibrationen klangen nach Pulsende schnell wieder ab. Bei einigen Geißeln war das jedoch nicht der Fall: Sie bewegten sich noch für Minuten hin und her. Die Hörorgane von Stechmücken können folglich wie die Ohren von Wirbeltieren Schwingungen erzeugen.

Diese selbstgenerierten Vibrationen traten nicht oft genug auf, um sie im Detail zu untersuchen. Dies änderte sich, als wir auf die Idee kamen, den Tieren das Betäubungsmittel Dimethylsulfoxid zu injizieren. Wie man schon lange weiß, beeinflusst es die Funktion der Rezeptorzellen in Insekten. Wir beobachteten jedoch einen weiteren, sehr überraschenden Effekt. Direkt nach der Injektion begannen die Antennengeißeln aller behandelten Tiere von selbst zu schwingen. Oft bewegten sie sich länger als eine Stunde mit hohen Amplituden hin und her.

Good vibrations für die Partnersuche

Auf diese Weise lassen sich selbstgenerierte Schwingungen von Stechmücken-Hörorganen also gezielt auslösen und analysieren. Solchen Analysen zufolge zeigen Stechmücken-Hörorgane in der Tat alle wesentlichen Kennzeichen aktiver Schwingungsverstärkung. Die Rezeptoreinheiten des Johnston'schen Organs können Bewegungen erzeugen und dadurch schallinduzierte Schwingungen verstärken. Diese Verstärkung findet genau bei den Frequenzen statt, bei denen arteigene Weibchen summen. Die Partnersuche ist sicher ein guter Grund, seine Ohren zu spitzen – auch und besonders bei Stechmücken.

Insekten und Wirbeltiere sind nur entfernt verwandt, und ihre Hörorgane haben sich unabhängig voneinander entwickelt. Dennoch häufen sich in jüngster Zeit die Hinweise auf Parallelen in den Mechanismen der akustischen Wahrnehmung beider Tiergruppen. Die Übereinstimmungen reichen von gemeinsamen Entwicklungs-Genen über analoge Antwort-Eigenschaften der Rezeptorzellen bis zum beiderseitigen Einsatz aktiver Schwingungsverstärkung. Auf Grund dieser umfassenden Parallelen verspricht die vergleichende Hörforschung bei Insekten und Wirbeltieren wesentliche neue Einblicke in die grundlegende Funktionsweise von Hörorganen. ■

Martin Göpfert *und* ***Daniel Robert*** *sind promovierte Biologen an der School of Biological Sciences der Universität Bristol.*

TEILCHENPHYSIK

Zerfall mit Fragezeichen

Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Kernphysik glauben Anzeichen für den neutrinolosen doppelten Betazerfall gefunden zu haben. Wenn sich dies bestätigen würde, wäre es ein sensationeller Durchbruch in der Teilchenphysik.

Von Georg Wolschin

Vielleicht hätten die Autoren die Überschrift ihres wissenschaftlichen Berichts mit einem Fragezeichen versehen sollen: „Hinweis auf den doppelten neutrinolosen Betazerfall?“ Ohne diesen Vorbehalt entfachte die Arbeit einen heftigen Disput unter Wissenschaftlern und in den Medien, ob die zentrale Aussage wirklich gerechtfertigt ist.

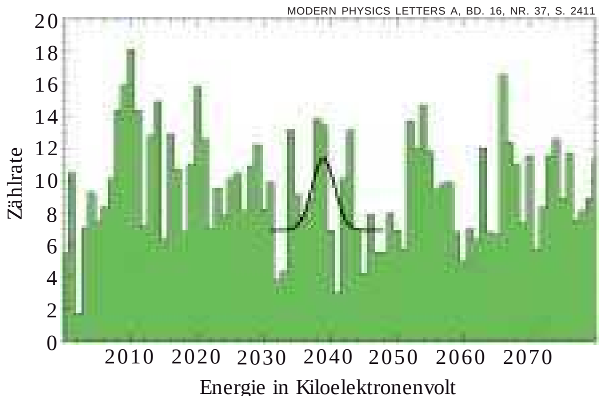
Immerhin geht es um bedeutende Dinge. Zunächst um die Natur des Neutrinos. Seit Wolfgang Pauli es vor siebzig Jahren postuliert hat, um die Energiebilanz beim Betazerfall eines Neutrons in ein Proton und ein Elektron auszugleichen, ist es eines der geheimnisvollsten und interessantesten Teilchen in der Physik geblieben. Das liegt daran, dass es nur äußerst schwer nachweisbar ist, weil es keine Ladung trägt, eine verschwindend kleine Masse hat und von den vier Grundkräften nur der so genannten schwachen Wechselwirkung und der noch viel schwächeren Gravitation unterliegt. Deshalb sind einige grundlegende Fragen über das Neutrino bis heute unbeantwortet – und das, obwohl es zu den häufigsten Teilchen im Universum überhaupt gehört.

Die wohl wichtigste ist die nach seiner Masse. Diese sollte laut Standardtheorie der Teilchenphysik gleich null sein, aber mittlerweile gibt es überzeugende Hinweise, dass dem nicht so ist. Ein Neutrino mit Masse aber hat je nach deren Wert womöglich große kosmologische Bedeutung, weil es die Geometrie des Universums beeinflussen könnte.

Eine weitere ungeklärte Frage lautet, ob das Neutrino sein eigenes Antiteilchen ist. Der italienische Physiker Ettore Majorana hatte dies schon 1937 postuliert. Träfe die Vermutung zu, dann nähme das Neutrino eine einzigartige Position im Zoo der kleinsten Bestandteile unserer Welt ein; denn mit Ausnahme der Bosonen, welche die Wechselwirkungen vermitteln, sind alle anderen elementaren Partikel so genannte Dirac-Teilchen: Sie haben halbzahligen Spin (Eigendrehimpuls), unterscheiden sich von ihren Anti-Teilchen und zerstrahlen bei der Verschmelzung mit ihnen.

Diese Frage würde der neutrinolose doppelte Betazerfall unmittelbar beantworten; denn er kann überhaupt nur stattfinden, wenn das Neutrino ein Majorana-Teilchen ist und eine von null verschiedene Ruhemasse hat. Mehr noch: Bei einer Messung des neutrinolosen Zerfalls ließe sich die Neutrinomasse viel genauer bestimmen, als dies bisher aus dem (einfachen) Betazerfall von Tritium (überschwerem Wasserstoff) möglich war.

So liefert die jetzt veröffentlichte Analyse der Max-Planck-Forscher eine untere Grenze für die Masse des Neutrinos, sofern dieses ein Majorana-Teilchen ist, im Bereich zwischen 0,05 und 0,2 Elektronenvolt. Dagegen ergeben die Tritium-Experimente derzeit eine obere Massengrenze von 2,2 Elektronenvolt – ohne die Frage nach der Dirac- oder Ma- ▶



Echt oder eingebildet? Mit statistischen Analysen glauben Forscher aus Heidelberg im Energiespektrum, das der Germanium-Detektor im italienischen Gran-Sasso-Labor in zehn Jahren aufgenommen hat, genau dort einen Peak (schwarze Kurve) ausmachen zu können, wo die Linie für den neutrinolosen doppelten Betazerfall erwartet wird.

(Seiten 18, 19 und 20: Anzeige und Beihefter)

jorana-Natur des Neutrinos zu beantworten. Beide Aussagen haben jeweils eine Wahrscheinlichkeit von 95 Prozent.

Schließlich verletzt der neutrinolose doppelte Betazerfall eine fundamentale Regel, wonach bei jeder Teilchenreaktion immer gleich viele Leptonen (Elektronen, Neutrinos) wie Anti-Leptonen entstehen: beim normalen Betazerfall zum Beispiel ein Elektron und ein Antineutrino. Bei der doppelten neutrinolosen Variante senden Kerne mit gerader Massenzahl dagegen lediglich gleichzeitig zwei Elektronen aus; die Kompensation durch zwei Antineutrinos unterbleibt.

Die Frage, ob es den neutrinolosen doppelten Betazerfall gibt, ist demnach von erheblicher Bedeutung für die Teilchenphysik. Daher begann im Jahre 1990 ein deutsch-russisches Team im Rahmen eines groß angelegten Experiments im Gran-Sasso-Untergrundlabor bei Rom mit der Suche danach (Spektrum der Wissenschaft 10/91, S. 20). Der Detektor aus fünf zusammen 11,5 Kilogramm schweren Germanium-Einkristallen, die auf 86 Prozent mit dem Isotop der Masse 76 angereichert sind, befindet sich dabei unter einem 1400 Meter dicken Felsmassiv und innerhalb einer weiteren Abschirmung aus Elektrolytkupfer und Blei. Damit soll störende Hintergrundstrahlung weitestgehend ausgeschaltet werden.

Beim neutrinolosen doppelten Betazerfall wandelt sich Germanium-76 in Selen-76 um. Die gleichzeitig ausgesandten Elektronen sollten eine scharfe Gesamtenergie von 2039 Kiloelektronenvolt haben. Anzeichen für eine entsprechende Linie im Summenenergie-Spektrum glauben nun vier Wissenschaftler um Volker Klapdor-Kleingrothaus vom Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg, dem Sprecher der deutsch-russischen Kollaboration, bei der Analyse der Daten aus dem Zeitraum zwischen August 1990 und Mai 2000 gefunden zu haben, die im vergangenen Jahr publiziert wurden.


MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR KERNPHYSIK, HEIDELBERG

Der erste von fünf Detektoren aus hochangereichertem Germanium-76 wurde 1990 rund 1400 Meter tief im Gran-Sasso-Tunnel bei Rom in Betrieb genommen. Er ist mit Elektrolytkupfer und dicken Bleiblöcken gegen äußere Strahlung abgeschirmt.

Streit um einen Peak

Mit bloßem Auge ist an dieser Stelle zwar kein deutlicher Peak zu erkennen. Die Heidelberger Forscher analysierten das Spektrum jedoch mit verschiedenen statistischen Verfahren. Dabei erhielten sie mehr oder weniger hohe Wahrscheinlichkeiten dafür, dass an der erwarteten Position tatsächlich ein Zacken aus dem Untergrund herausragt. Die Anwendung der vorsichtigen, so genannten Bayes'schen Statistik auf alle Daten lieferte einen Wert von 96,5 Prozent. Dieser erhöhte sich auf 97,4 Prozent, wenn die Daten von Detektor 4 weggelassen wurden (weil er die schwächste Energieauflösung und keine Abschirmung gegen Myonen hat). Dagegen ergab sich ein Wert von 96,8 Prozent, wenn nur die Messergebnisse seit 1995 (mit so genannter Pulsformanalyse) berücksichtigt wurden, die aus verschiedenen Gründen zuverlässiger erscheinen. Eine andere Analysemethode, die ebenfalls von der Particle Data Group empfohlen wird, liefert sogar 99,4 Prozent mit dem halbierten Datensatz beziehungsweise 99,8 Prozent ohne Detektor 4.

Mehr als ein mögliches Anzeichen für den illustren Zerfall wollen die Heidelberger Forscher in diesem Ergebnis dennoch nicht sehen. Immerhin bleibt danach eine Restwahrscheinlichkeit von rund drei Prozent, dass es sich bei dem Peak um eine bloße statistische Schwankung handelt. Aber selbst wenn er „echt" ist, könnte er zum Untergrund gehören. Zwar betonen die Autoren des Berichts, dass der Peak nach derzeitiger Kenntnis nicht von einer Gammastrahlungs-Emission radioaktiver Kerne stammen kann, welche die kosmische Strahlung in der Apparatur oder ihrer Umgebung erzeugt hat. Dennoch lässt sich nicht ausschließen, dass es sich um eine bislang unbekannte Gamma-Linie handelt.

Angesichts der Brisanz des Ergebnisses haben 26 Kollegen einen Kommentar ins Internet gestellt, in dem sie in insgesamt neun Punkten Einwände gegen die Ergebnisse der Analyse erheben. So weisen sie darauf hin, dass sich im Analysebereich drei weitere Maxima ungeklärter Herkunft mit größerer statistischer Signifikanz befinden. Das lässt den Verdacht aufkommen, dass der vierte Peak womöglich ähnlich ungeklärter Herkunft ist und nicht unbedingt von dem gesuchten doppelten Betazerfall stammen muss; dass er an der richtigen Position liegt, könnte Zufall sein. Die Heidelberger Forscher glauben jedoch, die meisten Einwände entkräften zu können.

Ferner haben drei italienische Physiker die Daten nochmals ausgewertet. Dabei fanden sie nur eine Wahrscheinlichkeit von 87 Prozent dafür, dass es sich tatsächlich um einen Peak handelt. Allerdings benutzten sie ein Analyseverfahren, das für sehr geringe Zählraten weniger geeignet ist.

Zwar sollte sich das Signal, falls es echt ist, mit der Zeit verstärken. Der Vertrag mit dem Moskauer Kurchatov-Institut über die deutsch-russische Kollaboration läuft jedoch Ende 2003 aus. Bis dahin ist keine große Verbesserung der Statistik mehr zu erwarten.

Eine Bestätigung oder Widerlegung des jetzigen Ergebnisses könnte dagegen das schon länger geplante Genius-Projekt liefern. Dabei sollen die Germanium-Detektoren in einem Tank mit flüssigem Stickstoff von zwölf bis dreizehn Metern Durchmesser untergebracht werden. Dadurch würden alle Materialien, die radioaktive Verunreinigungen enthalten könnten, aus ihrer Nähe entfernt, was den Untergrund um den Faktor tausend und mehr absenken dürfte. Außerdem ist geplant, statt der bisherigen 11,5 Kilogramm bis zu eine Tonne an hochangereichertem Germanium-76 einzusetzen. Die Empfindlichkeit des Detektors stiege dadurch erheblich. Gegenwärtig wird eine Testanlage im Gran Sasso aufgebaut, die voraussichtlich Anfang 2003 den Betrieb aufnimmt. Genius selbst könnte in etwa fünf Jahren starten. ■

Georg Wolschin *ist theoretischer Physiker und Wissenschaftsjournalist; er lehrt an der Universität Heidelberg.*

PHARMAKOGENETIK

Keine Frage der Hautfarbe

Nicht jeder verträgt jedes Arzneimittel. Um Nebenwirkungsrisiken für größere Populationen abzuschätzen, werden pharmazeutische Studien nach ethnischen Gruppen ausgewertet. Sinnvoller wäre jedoch die Unterteilung nach DNA-Merkmalen.

Von Petra Jacoby

Menschen können sehr verschieden auf Medikamente reagieren. Entsprechend lang sind oft die Listen möglicher Nebenwirkungen in den Packungsbeilagen. Meist liegt es an genetischen Unterschieden, dass einige Patienten ein Präparat gut vertragen, andere dagegen – im harmlosesten Fall – über Kopfschmerzen oder Übelkeit klagen.

Welche Gene die Verträglichkeit eines bestimmten Arzneimittels beeinflussen, ist aber nur in den seltensten Fällen bekannt. Daher lässt sich das Risiko eines einzelnen Patienten gewöhnlich nicht ermitteln, und der Arzt kann sich nur an Wahrscheinlichkeitsprognosen orientieren, wenn er ein Medikament verordnet. Einige der unerwünschten Begleiteffekte sind sehr selten, da die verantwortlichen Mutationen nur bei wenigen Personen auftreten. Andere kommen dagegen häufig vor. In diesem Fall ist es wichtig, die betroffene Bevölkerungsgruppe möglichst exakt zu ermitteln. Das geschieht im Verlauf von Studien, die der Zulassung eines Arzneimittels vorausgehen.

Bei diesen Kontrollen werden die Probanden üblicherweise nach Aussehen und Herkunft in die ethnischen Gruppen „Schwarze", „Asiaten" und „Europäer" – im Sinn von hellhäutig – eingeteilt. So kann man feststellen, ob in einer der Populationen ein erhöhtes Unverträglichkeitsrisiko besteht, und dies später in der klinischen Praxis berücksichtigen.

Jüngste Forschungsergebnisse von James F. Wilson und seinen Mitarbeitern am University College in London zeigen nun allerdings, dass eine Einteilung über so genannte Mikrosatelliten-DNA-Marker zu wesentlich präziseren Aussagen über gruppenspezifische Nebenwirkungen führen würde (*Nature Genetics*, *Bd. 29, S. 265*). Bei Mikrosatelliten handelt es sich um DNA-Abschnitte, die im Unterschied zu den Genen keine Bauanleitung für irgendein Protein enthalten; ob sie überhaupt eine Funktion haben und welche oder ob es sich nur um angehäuften DNA-Müll in unserem Erbgut handelt, ist noch unklar. Jedenfalls variiert die Länge einander entsprechender Mikrosatelliten innerhalb der Bevölkerung ziemlich stark.

Dies kann dazu dienen, die genetische Verwandtschaft zwischen Individuen festzustellen, und wird unter anderem für Vaterschaftstests ausgenutzt. Je mehr Mikrosatelliten bei zwei Personen eine ähnliche Länge haben, desto genauer

dürfte ihr Genom insgesamt übereinstimmen. Mit einem gröberen Raster gelingt es auf diese Weise auch, eine Population mit gleicher Abstammung und somit ähnlichem genetischen Erbe vom Rest der Bevölkerung abzugrenzen.

Für eine Mikrosatelliten-Analyse wird zunächst eine Blutprobe genommen und daraus DNA gewonnen. Mittels Polymerasekettenreaktion (PCR) lassen sich dann – durch Auswahl entsprechender „Primer“ (einer Art Mustervorlage der zu kopierenden DNA-Abschnitte) – die gewünschten Mikrosatelliten vervielfachen und analysieren. Die so ermittelten Längen ergeben ein charakteristisches Verteilungsmuster oder Profil. Computerprogramme können die Mikrosatelliten-DNA-Profile mehrerer Personen vergleichen und ihre Ähnlichkeit bewerten.

Ethnisches Raster zu grob

Wilson und seine Mitarbeiter untersuchten 39 Mikrosatelliten im Genom von 354 Männern aus acht Populationen (südafrikanische Bantu, Äthiopier, Afro-Kariben, Chinesen, Neuguineer, Norweger, Armenier und Juden europäischer Abstammung). Indem sie Teilnehmer mit ähnlichen genetischen Daten zusammenfassten, erhielten sie schließlich vier klar unterscheidbare Gruppen.

Dabei gab es einige Überraschungen. Beispielsweise zeigten nur 24 Prozent der Äthiopier gemeinsame Merkmale mit den Bantu und den meisten Afro-Kariben. Dagegen gehören 62 Prozent in dieselbe Gruppe wie die Mehrzahl der Norweger, Juden und Armenier. Nach den gängigen Kriterien bei pharmazeutischen Studien würden aber alle einfach als „Schwarze“ gelten. Ebenso splitten sich Chinesen und Neuguineer, die traditionell als „Asiaten“ in einen Topf geworfen werden, in zwei fast vollkommen getrennte Fraktionen auf.

Aber reagieren die so ermittelten vier genetischen Gruppen auch verschieden auf Medikamente? Um das zu überprüfen, betrachteten Wilson und seine Kollegen sechs Gene für Enzyme, die Arzneimittel abbauen, und untersuchten, wie häufig normale und mutierte Varianten davon jeweils vorkommen. Wie sich zeigte, differiert bei fünf der sechs ausgewählten Erbfaktoren die Verbreitung von Mutanten deutlich zwischen den vier Gruppen. Ein Beispiel ist das Gen für die N-Acetyltransferase 2 (NAT2). Dieses Enzym entgiftet Substanzen wie Coffein und das Antibiotikum Isoniazid.

In den vier DNA-Marker-Gruppen beträgt der Anteil mutierter NAT2-Gene 17, 33, 46 und 74 Prozent. Ihre Mitglieder würden also, statistisch gesehen, deutlich verschieden auf ein Medikament reagieren, das von NAT2 abgebaut wird. Angehörige der Gruppe, in der NAT2-Mutationen mit 74 Prozent extrem häufig auftreten, wären für Nebenwirkungen dieser Substanzen besonders anfällig.

Somit scheint das Mikrosatelliten-Profil eines Menschen tatsächlich dessen pharmazeutisch relevante Genausstattung widerzuspiegeln. Aber ist es auch der gängigen ethnischen Einteilung überlegen? Um das zu testen, gruppierte Wilsons Team die Versuchspersonen auch nach dem üblichen Raster („Schwarze“: Bantu, Äthiopier und Afro-Kariben; „Asiaten“: Chinesen und Neuguineer; „Europäer“: Norweger, Armenier und Juden). Das Ergebnis war eindeutig: Die Mutanten der sechs untersuchten Gene verteilen sich wesentlich gleichförmiger über die drei ethnischen als über die vier genetischen Gruppen. Das verwischt die unterschiedlichen Fähigkeiten zur Arzneimittelentgiftung in der Bevölkerung in einem Maße, dass sie oft gar nicht mehr nachweisbar sind.

Besonders krass ist der Fall des Enzyms NAD(P)-Chinon-Oxidoreductase. Wie das genetische Verfahren zeigte, haben 53 Prozent der Chinesen, aber nur 11 Prozent der Neuguineer eine Mutation im betreffenden Gen. Da sie bei der eth-nischen Einteilung jedoch als „Asiaten“ zusammengefasst werden, ist dieser Unterschied nicht mehr erkennbar. Im Endeffekt wird das Nebenwirkungsrisiko bei den Chinesen grob unterschätzt und bei den Neuguineern drastisch überbewertet.

Erhöhter Aufwand lohnt sich

Somit sind ethnische Merkmale wie Hautfarbe und Herkunft als Anhaltspunkte für die Reaktion eines Patienten auf ein Medikament den Mikrosatelliten-DNA-Markern klar unterlegen. Eine Umstellung auf dieses Klassifizierungssystem wäre allerdings mit zusätzlichem Aufwand verbunden. Bisher erfolgte die ethnische Einordnung von Teilnehmern pharmazeutischer Studien und von Patienten in der klinischen Praxis einfach mit Hilfe von Fragebögen. Stattdessen müsste nun ein Bluttest zur Bestimmung der DNA-Merkmale durchgeführt werden.

Die dadurch verursachten Mehrkosten hängen letztlich von der Anzahl der untersuchten Mikrosatelliten ab: Grob geschätzt, fallen für jeden einzelnen 80 bis 100 Euro an. Wahrscheinlich lässt sich die in der Studie verwendete Anzahl jedoch von 39 auf weniger als zehn Mikrosatelliten reduzieren. Dadurch dürfte sich – inklusive der fixen Laborkosten – ein Preis von rund 1000 Euro für eine Analyse ergeben. Das hört sich erst einmal hoch an, ist im Verhältnis zu den enormen Summen, die eine Arzneimittel-Studie insgesamt verursacht, aber durchaus vertretbar. Ähnlich sieht es in der klinischen Praxis aus. Selbstverständlich würden nur solche Patienten getestet, die über lange Zeit ein Präparat einnehmen müssen, für das abweichende Reaktionen innerhalb der verschiedenen genetischen Gruppen festgestellt wurden.

Vor allem bei Medikamenten mit potenziell schwerwiegenden Nebenwirkungen erscheint jede Verbesserung der gängigen Beurteilungsmethoden sinnvoll. Risikoärmere und individuell passendere Arzneimittel sollten den damit verbundenen höheren Aufwand rechtfertigen. ■



Petra Jacoby *ist Diplombiologin und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Wittlich.*

Brutstätte junger Sterne

Wie ein Untier, das sein schauriges Haupt aus einem Meer von Blut erhebt, wirkt diese kosmische Säule aus Gas und Staub. Das aus drei Aufnahmen zusammengesetzte Farbbild dokumentiert eindrucksvoll die Fähigkeiten der *Advanced Camera for Surveys*, die Astronauten bei der Überholung des Hubble-Weltraumteleskops Anfang März neu installiert haben. Gezeigt ist das 2,5 Lichtjahre große obere Ende des 2500 Lichtjahre entfernten Conus-Nebels im Sternbild Einhorn. Heiße junge Sterne oberhalb des Bildes verdampfen mit ihrer UV-Strahlung den Rand der dunklen Wolke und lassen den entweichenden Wasserstoff rot aufglühen. Zudem reflektiert der Staub das blauweiße Licht umgebender Sterne, die an der Spitze des Nebels teilweise durchscheinen. Das Motiv gleicht den Säulen, welche die *Hubble Deep Field Camera* 1995 in geringerer Auflösung im Adlernebel im Sternbild Schlange aufgenommen hat. Die fingerartigen Strukturen gelten seither als typische Merkmale der Brutstätten junger Sterne in kosmischen Nebeln.

ACS SCIENCE TEAM, NASA

Dicke Luft

Nach der langen Polarnacht liegen oft graubraune Dunstschwaden über der Arktis. Woher kommen und wie entstehen sie? Mit einem neu entwickelten „Sternfotometer“, das auch in den dunklen Wintermonaten Schwebstoffe in der Luft messen kann, ließ sich diese Frage jetzt endgültig klären. Anders als in mittleren Breiten scheint der Smog am Nordpol den Treibhauseffekt zu verstärken.

Von Andreas Herber und Gert Lange

Keine Region auf unserem Planeten ist so entlegen und fern jeder menschlichen Zivilisation wie die Polargebiete. Nirgendwo sonst sollte also die Luft so rein und der Himmel so klar sein. Doch weit gefehlt! In jedem Frühjahr, wenn nach der langen Polarnacht die Sonne wieder über dem Horizont auftaucht, trüben graubraune bis schwärzliche Schleier die Atmosphäre in der Arktis und sorgen für eine Luftverschmutzung ähnlich der in den Industrieregionen Mitteleuropas. Woher kommt dieser so genannte Arctic Haze (arktische Dunst)?

Tatsächlich handelt es sich, wie man inzwischen weiß, um „gealterte“ Luftschwebteilchen, fachsprachlich: Aerosole, die aus Industriegebieten mittlerer Breiten herantransportiert werden. Wann und wie das genau geschieht, konnte erst in den letzten Jahren endgültig geklärt werden, nachdem es gelungen war, die Konzentration dieser Partikel das ganze Jahr hindurch zu verfolgen. Ermöglicht wurde dies durch Messgeräte mit enorm gesteigerter Empfindlichkeit. Sie können selbst das schwache Leuchten einzelner Sterne noch für die Bestimmung der Aerosolkonzentration während der winterlichen Polarnacht ausnutzen. Davor waren die Messungen auf Tageslicht angewiesen und damit auf das Sommerhalbjahr beschränkt.

Bekannt ist das Phänomen der Schmutzschwaden über dem Nordpolargebiet schon seit den 1950er Jahren. Damals berichteten amerikanische Militärflieger, die regelmäßig das Wetter im amerikanischen Sektor der Arktis bis zum Pol erkundeten, über Dunstschwaden unbekannter Herkunft. Aus dieser Zeit stammt auch der Name Arctic Haze, den der Offizier Murry Mitchell jr. 1956 prägte. Russische Wissenschaftler maßen ab Mitte der 1950er Jahre gleichfalls eine saisonale Lufttrübung über der sibirischen Arktis. Doch die rätselhaften Beobachtungen wurden bald wieder vergessen, und die Aerosolforschung blieb weitere zwei Jahrzehnte ein vernachlässigtes Stiefkind der Atmosphärenphysik.

Das begann sich erst zu ändern, als Ende der 1960er Jahre die Schadstoffbelastung in den unteren Luftschichten, der bis zehn Kilometer Höhe reichenden Troposphäre, vor allem über Industriegebieten so stark zunahm, dass der Dunstschleier nicht nur zu sehen war, sondern auch gesundheitliche Schäden verursachte. In den Städten kam es zu ersten Fällen von Smog-Alarm, und die Luftverschmutzung wurde zunehmend als Umweltproblem erkannt.

Vor diesem Hintergrund befasste sich Glenn E. Shaw von der Universität von Alaska in Fairbanks ab 1972 auch wieder mit dem arktischen Dunst. Doch als Einzelkämpfer konnte er nur punktuelle Untersuchungen durchführen. Umfangreichere Daten lieferten erst die vier AGASP-Flugkampagnen (*Arctic Gas and Aerosol Sampling Program*, Programm zur Gewinnung arktischer Gas- und Aerosolproben; *gasp* heißt aber auch keuchen) zwischen 1982 und 1992. Auch sie ergaben aber lediglich regional begrenzte Momentaufnahmen. ▶

Dichter gelblicher Dunst (Arctic Haze) trübt die Atmosphäre über dem Meereis im Umkreis der russischen Inselgruppe Sewernaja Semlja. Die Aufnahme stammt von einem Messflug im März 1990.

am Nordpol

Wie Industrieabgase die Arktis verschmutzen



BEIDE FOTOS: U. LEITERER

Bei dieser Arctic-Haze-Episode über dem Krenkel-Observatorium auf Franz-Josef-Land im März 1989 betrug die Horizontalsicht nur etwa 500 Meter.

In den Blickpunkt einer breiten Öffentlichkeit geriet die polare Atmosphäre, wenn auch nicht der arktische Dunst, schließlich 1985 durch eine andere Schreckensmeldung: die Entdeckung des Ozonlochs über der Antarktis. Sie bewies schlaglichtartig, dass die Luftverschmutzung kein lokales Phänomen der Industrieregionen ist und dass industrielle Emissionen verheerende Auswirkungen auf die Luftchemie selbst an weit entfernten Orten haben können. Diese Erkenntnis war so schockierend, dass sich auch das wissenschaftliche Interesse in den folgenden Jahren den Polarregionen zuwandte. Allerdings richtete es sich primär auf das Ozon. Dass an dessen Zerstörung ganz wesentlich Aerosole beteiligt sind – nämlich die Eispartikel der polaren Stratosphärenwolken –, sollte sich erst später zeigen.

Vorerst genossen die Schwebteilchen also weiterhin nur wenig Aufmerksamkeit. Messungen ihrer Konzentrationen in der Arktis blieben sporadisch und auf die Sommermonate beschränkt. Point Barrow in Alaska ist denn auch die einzige Forschungsstation, für die dank der Bemühungen von Shaw eine längere durchgängige Messreihe des Aerosols in hohen geografischen Breiten existiert – freilich nur unter Tageslichtbedingungen, also während der „warmen" Jahreszeit. Die Station liegt bei 71 Grad Nord und damit knapp jenseits des Polarkreises bei 66,5 Grad Nord. Die dort aufgenommene Messreihe reicht immerhin bis 1971 zurück.

In den 1980er Jahren alarmierte allerdings nicht nur das Ozonloch die Öffentlichkeit. Zugleich wuchs die Besorgnis über einen bedrohlichen Klimawandel, den der Mensch unabsichtlich auslösen könnte. Plausible Theorien und beobachtete Temperaturtrends legten nahe, dass anthropogene Treibhausgase wie Kohlendioxid eine globale Erwärmung verursachen könnten. Mit Computersimulationen suchten Wissenschaftler den Effekt zu quantifizieren. Der von ihnen vorhergesagte Temperaturanstieg erwies sich jedoch als zu hoch. Als Grund dafür, dass die tatsächliche Erwärmung geringer ausfiel als erwartet, wurden schließlich die Aerosole erkannt. Sie streuen einen Teil des Sonnenlichts ins Weltall zurück, bevor er den Erdboden erreicht, und wirken dadurch dem Treibhauseffekt entgegen (Spektrum der Wissenschaft 4/94, S. 46). Damit rückten die lange vernachlässigten Schwebteilchen endlich ins Zentrum der Atmosphärenforschung.

Hinzu kamen neue Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Kälteperioden und Vulkanausbrüchen. Der kälteste Sommer in den letzten 600 Jahren war der von 1601; als Ursache der Abkühlung wurde der Ausbruch des Huaynaputina in Peru ein Jahr zuvor erkannt. In ähnlicher Weise sorgten die heftigen Eruptionen des indonesischen Tambora im Jahre 1815 dafür, dass 1816 als das „Jahr ohne Sommer" in die Annalen einging. Beide Vulkane schleuderten große Mengen an Schwefelgasen in die Atmosphäre, aus denen sich Sulfat-Aerosole bildeten. Die Aschepartikel und Schwefelsäuretröpfchen des Tambora trübten fünf Jahre lang die gesamte Nordhemisphäre. Weil die Sonne nicht zu sehen war und der Weizen nicht reifte, kam es zu Hungersnöten. Solche Extrem-Ereignisse unterstrichen die Bedeutung, die den atmosphärischen Aerosolen für das Leben auf der Erde zukommt.

Auf Grund dieser neuen Einsichten begann das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) sofort nach der Gründung der deutschen Arktisstation „Carl Koldewey" auf Spitzbergen im März 1991 mit kontinuierlichen Messungen der Schwebteilchen über Ny-Ålesund. Das geschah zum einen nach dem Lidar-Prinzip (*light detection and ranging*). Dabei wird ein Laserstrahl in die Atmosphäre geschickt und das von Aerosolen reflektierte Licht registriert.

Bei dem Sternfotometer in einer Kuppel auf dem Dach der Forschungsstation Koldewey in Spitzbergen genügt das Licht eines hellen Sterns für die Messung des Schwebstoffgehalts der Atmosphäre. Ein Teleskop (weißer Zylinder) bündelt das schwache Licht eines Sterns, der mit einem kleinen Suchfernrohr zunächst grob angepeilt wird. Zur Feineinstellung dient ein Mikroskop am Messkopf hinter dem Teleskop.



A. HERBER

Ein schon vorhandenes Lidar-Gerät auf der Station „Carl Koldewey", mit dem bisher Ozon gemessen worden war, wurde mit einem zweiten Laser und einem neuen Detektor versehen, sodass sich damit auch die optischen Eigenschaften der Schwebteilchen im Höhenbereich zwischen zehn und vierzig Kilometern untersuchen ließen. Dort bilden sich bei tiefen Temperaturen die polaren Stratosphärenwolken, von denen man inzwischen vermutete, dass sie eine wichtige Rolle bei der Zerstörung der Ozonschicht spielen.

Das Sonnenlicht bringt es an den Tag

Die Lidar-Messungen allein liefern aber keine Absolutwerte der Aerosolkonzentration, sondern lediglich Aussagen über ihre Höhenverteilung und chemische Zusammensetzung. Außerdem können sie die unterste Grenzschicht (einige hundert Meter), in der sich ein großer Teil des Aerosols befindet, nicht erfassen. Deshalb startete das AWI zusätzlich eine Messreihe des Gesamtaerosols mit Hilfe von Sonnenfotometern, welche die Streuung des Sonnenlichts an Schwebteilchen in der Atmosphäre registrieren. Beide Verfahren sind nötig, wenn man sich ein Bild von der Verteilung des Aerosols machen will: Lidar für Vertikalprofile, Fotometer für die Gesamtmenge innerhalb einer Luftsäule.

Dass es so lange dauerte, bis die Aerosole die gebührende Beachtung fanden, hatte einen weiteren Grund: Noch bis weit in die 1990er Jahre gab es keine

Literaturhinweise

Continuous Day and Night Aerosol Optical Depth Observations in the Arctic between 1991 and 1999. Von A. Herber et al. in: Journal of Geophysical Research, im Druck.

Tropospheric Aerosol Measurements in the Arctic by FTIR Emission and Star Photometer Extinction Spectroscopy. Von E. Becker, J. Notholt und A. Herber in: Geophysical Research Letters, Bd. 26, S. 1711, 1999.

Erste Ergebnisse von Messungen der optischen Dicke des Aerosols an der Antarktis-Station „Georg Forster" 1988/89. Von A. Herber, U. Leiterer und N. Flaake in: Zeitschrift für Meteorologie, Bd. 40, Nr. 4, S. 269 (1990).

Weblinks finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft".*

standardisierten Messgeräte für ihre Untersuchung. Zwar hatte sich bereits in den 1960er Jahren die Halbleitertechnik so weit entwickelt, dass sie den Bau von Sonnenfotometern erlaubte. Aber wegen des zunächst geringen Interesses an der Aerosolforschung waren die gerätetechnischen Entwicklungen einiger Firmen im Sande verlaufen; ihre Produkte hatten keinen Markt gefunden.

In dieser Situation mussten die Wissenschaftler die benötigten Instrumente notgedrungen selbst anfertigen. So entwickelte eine Arbeitsgruppe um den Atmosphärenphysiker Ulrich Leiterer vom Aerologischen Observatorium Lindenberg (Brandenburg) im Jahre 1978 ein eigenes Sonnenfotometer. Es beruhte auf einem bis dahin unüblichen Messprinzip, bei dem die Sonne selbst in der Messblende abgebildet wird. Mit diesem Boden-Atmosphären-Spektrometer ließ sich sowohl die Intensität des direkten Sonnenlichts als auch die Strahldichte unterschiedlicher Oberflächen und des Himmels messen.

Ostdeutsche Polarforscher setzten zwei dieser Geräte 1984/85 erfolgreich für ein Strahlungsexperiment in der Antarktis ein. Sie untersuchten damit die ungestörte Aerosolverteilung, also den natürlichen Hintergrund, gegen den sich eventuelle jahreszeitliche Schwankungen der Teilchenkonzentration abheben. Außerdem ging es darum, Vergleichsdaten für die von Satelliten gewonnenen meteorologischen Messwerte zu erhalten.

Eine 1988 an der ehemaligen DDR-Forschungsstation „Georg Forster“ auf dem antarktischen Kontinent begonnene kontinuierliche Messreihe wurde ab 1991 an der deutschen Südpolarstation „Neumayer“ fortgesetzt. Ein weiteres Sonnenfotometer aus der Gruppe von Leiterer ging an die Station Koldewey auf Spitzbergen.

Ein solches Gerät ist im Grunde nichts anderes als ein Lichtmesser. Es wird direkt auf die Sonne gerichtet und nimmt die von dort einfallende Strahlung auf. Ein Rad mit verschiedenen Filtersystemen, das von Hand oder automatisch drehbar ist, lässt der Reihe nach nur jeweils Licht bestimmter Wellenlängen passieren, das dann auf einen Detektor trifft. Die „Bandbreite“ reicht dabei von 350 bis 1065 Nanometern, also von der ultravioletten bis zur infraroten Strahlung. Damit erfasst das Gerät mehr als achtzig Prozent des Energieangebots der Sonne und vor allem auch jenen Bereich, der für das Leben auf der Erde der wichtigste ist: das sichtbare Spektrum.

Wie viel Licht einer bestimmten Wellenlänge am Außenrand der Atmosphäre ankommt, lässt sich über die so genannte Langley-Kalibrierung ermitteln, die im Hochgebirge durchgeführt wird. Auf die Erdoberfläche gelangt allerdings nur ein Teil dieses Lichts, der Rest wird ins All gestreut. Die Differenz zeigt die Reinheit oder Trübung der Atmosphäre an. Als Messgröße dient üblicherweise die „spektrale optische Dicke des Aerosols“ oder kurz AOD (*Aerosol Optical Depth*), ein dimensionsloser Verhältniswert.

Ein Vulkan funkt dazwischen

Als sich die Forscher auf der Koldewey-Station jedoch ab 1991 mit ihrem Sonnenfotometer endlich daranmachten, die Ursache des arktischen Dunstes aufzuklären, brachte ein Naturereignis erst einmal alle ihre Pläne durcheinander. Es gelang ihnen gerade noch, im Sommer 1991 die normale Aerosolkonzentration über Spitzbergen zu messen. Dann brach der Vulkan Pinatubo auf den Philippinen aus und schleuderte gewaltige Mengen vor allem schwefelhaltiger Aerosole in die Atmosphäre. Das war Pech und Glück zugleich. Pech, weil der Ausbruch die normalen Verhältnisse störte und das interessierende Phänomen zunächst einmal unter einem viel stärkeren Signal begrub. Glück, weil er die Möglichkeit bot, an einem klar definierten, bestens dokumentierten und gut verstandenen Ereignis die Apparaturen zu testen.

Diesen Test bestanden sie glänzend. Mit den beiden Sonnenfotometern auf der Koldewey- und der Neumayer-Station ließ sich die Ausbreitung der Pinatubo-Aerosole sowohl für die Arktis als auch für die Antarktis präzise verfolgen. Dabei fiel auf, wie schnell sich die vulkanischen Partikel über den Globus verteilten. Schon drei Monate nach dem Ausbruch registrierten die Wissenschaftler auf Spitzbergen einen sprunghaften Anstieg des Aerosolgehalts in Höhen zwischen elf und achtzehn Kilometern. Mit einem so raschen Transport aus den Tropen in hohe nördliche Breiten hatte niemand gerechnet. Außerdem überraschte, dass sich die Aerosole in den unteren Stratosphärenschichten konzentrierten – dicht über der Grenze zur Troposphäre, die sich in der Arktis in etwa zehn Kilometern Höhe befindet.

Im März 1992 war die optische Dicke für die Wellenlänge von 500 Nanometern (grün) durch die vulkanischen Emissionen auf fast 0,3 geklettert, das Sechsfache ihres über zehn Jahre gemessenen Mittelwerts von 0,05 im arktischen Sommer. Mit Hilfe des Lidars, eines Infrarot-Spektrometers und der Fotometer ließ sich zugleich verfolgen, wie die Teilchen sich allmählich absetzten, weil sie sich mit der Zeit zusammenballten und schwerer wurden. Dieser Vorgang zog sich über vier Jahre hin. Erst ab 1995 ▶



D. NAGEL

Seit 1983 besitzt das AWI die beiden Forschungsflugzeuge „Polar 2“ und „Polar 4“, Sonderversionen des Mehrzweckflugzeugs Dornier 228/101. Mit ihren Rad-Skifahrwerken können sie auf Betonbahnen oder Schneepisten starten und landen. Erweiterte flugtechnische Ausrüstung, verstärkte Generatoren, Zusatztanks, Enteisungsanlagen an Propellern und Tragflächen sowie eine verbesserte Isolierung des Innenraums machen sie polartauglich. Sie sind für Blindflug ausgestattet und können auch unter White-out-Bedingungen landen, wenn Eisnebel die Sichtweite fast auf null reduziert.


D. NAGEL

Wie der Blick ins Innere der „Polar 4" während eines Aerosolmessfluges 1998 über dem Nordpolargebiet deutlich macht, sind die Forschungsflugzeuge des AWI fliegende Laboratorien.

wurden wieder Werte wie vor dem Vulkanbausbruch gemessen.

Die Atmosphärenphysiker des AWI nutzten die Pinatubo-Episode noch zur Erledigung einer anderen wichtigen Aufgabe. Schon seit 1978 ließen sich Aerosole im Prinzip auch von Satelliten aus messen. Die dabei erhaltenen Daten mussten jedoch kalibriert und validiert werden, um quantitative Aussagen zu erlauben. Die AWI-Forscher unterzogen sich 1993 der Mühe, die Messreihen verschiedener Satelliten zu überprüfen und sie mit eigenen direkten Messungen zu vergleichen. Dazu flogen sie mit einer russischen IL-18 und einer Dornier-Maschine bis in die Stratosphäre und gewannen aus jenen Höhen, wo sich die Aerosole ansammeln, mit dem Sonnenfotometer direkt unverfälschte Werte.

Satelliten-Fotometer machen Messungen entlang einer Sichtlinie, die tangential oder „streifend" an der Erdoberfläche entlang durch die Atmosphäre zur Sonne verläuft. Sie versagen bei tiefen und noch dazu stark verschmutzten Atmosphärenschichten, weil der Satellit die Sonne dann gar nicht mehr sieht. Für diese Höhen müssen die Satellitenwerte folglich extrapoliert werden. Nasa-Wissenschaftler hatten das mit Aerosoldaten des Sage-II-Fotometers (*Stratospheric Aerosol and Gas Experiment*) auf dem Satelliten ERBS gemacht. Der Vergleich mit den direkten Messwerten der AWI-Forscher zeigte nun jedoch, dass die Extrapolation falsch war und zu geringe Werte für das Aerosol der unteren Stratosphärenschichten ergab.

Dies hat durchaus auch große praktische Bedeutung. Die Messungen mit dem Sonnenfotometer vom Boden aus liefern die gesamte Aerosolkonzentration in der Atmosphäre entlang der Sichtlinie zur Sonne. Wenn sich nun aus Satellitendaten der Anteil ergibt, der auf die Stratosphäre entfällt, entspricht die Differenz jener Schwebstoffmenge**,** die sich in der Troposphäre angesammelt hat. Diese ist aber besonders interessant, weil sie Phänomene wie den arktischen Dunst verursacht. Tatsächlich ergaben die Messungen der AWI-Forscher, dass der Anteil des stratosphärischen Aerosols im Mittel nicht mehr als zehn Prozent der Gesamtmenge beträgt. Nur im Falle eines Vulkanausbruchs kann er deutlich höher liegen – wenn Gase sehr hoch bis in die Stratosphäre geblasen werden, wo sie lange verbleiben, weil dort kein Wetterkreislauf wie in der Troposphäre stattfindet, durch den sie ausgewaschen werden.

Was tut sich in der Polarnacht?

Während der Pinatubo-Phase bestand das Lindenberger Fotometer gewissermaßen seinen Härtetest. Allerdings funktionierte es noch immer nur unter Tageslichtbedingungen, also von Frühjahr (März) bis Herbst (September). Die Vorgänge während der Polarnacht dagegen blieben buchstäblich im Dunkeln.

Diese Wissenslücke war ärgerlich; denn wenn die Sonne für Monate unter dem Horizont verschwunden war, könnte sich das vorbereiten, was dann im Frühjahr offenbar wird: beispielsweise der arktische Dunst oder auch die Zerstörung des Ozons; Letztere beginnt an polaren stratosphärischen Wolken, die sich schon im Polarwinter bilden (was bis dahin niemand wusste).

Als Lichtquelle für spektrometrische Messungen in der Polarnacht standen aber nur der im Vergleich zur Sonne etwa eine Million Mal schwächer scheinende Mond und die noch blasseren Sterne zur Verfügung. Wollte man sie heranziehen, musste die Empfindlichkeit des Detektors erheblich gesteigert werden.

Die bis dahin benutzten Sonnenfotometer arbeiteten mit einfachen Silizium-Dioden. Dabei erzeugt der Lichteinfall im Halbleitermaterial einen messbaren Elektronenstrom. Eine erste Verbesserung versprach eine neue, bis ins Letzte ausgereizte Silizium-Diode der japanischen Firma Hamamatsu. Messtests mit ihr ergaben, dass sie im Stande war, sowohl das Sonnen- als auch das Mondlicht exakt aufzunehmen. Die Sonde war allerdings für Strahlungsmessungen an Wolken entwickelt worden. Immerhin erlaubte sie eine maximale Signalverstärkung über acht Größenordnungen – und zwar linear. Das war eine entscheidende Forderung, denn nur so war eine problemlose Interpolation zwischen einem minimalen und einem maximalen Lichtsignal möglich.

Das Bundesforschungsministerium finanzierte die Anpassung der elektronischen Verstärkung an die Diode. Eine Ausgründung aus dem Lindenberger Observatorium, die Firma Dr. Schulz & Partner, stellte auf dieser Basis dann ein neues und die folgenden, weiterentwickelten Fotometer her. Mit ihnen konnte einer der Autoren (Andreas Herber) im Januar 1995 schließlich erstmals Aerosol-Daten aus der Polarnacht gewinnen.

Das Ergebnis war eine große Überraschung. Die gefundenen Werte lagen so niedrig wie üblicherweise im arktischen Sommer. Das enttäuschte die Erwartungen der Atmosphärenphysiker. Sie hatten aus meteorologischen Befunden geschlossen, dass sich auch im Winter Dunstschichten am Nordpol ausbreiten würden.

Das ganze Jahr über bildet die Polarfront eine Art Wall um die Arktis – ohne deswegen eine völlig undurchlässige Barriere zu sein. Im Sommer verläuft sie bei 70 bis 75 Grad nördlicher Breite und stoppt so den Luftstrom aus dem Süden. Dadurch bleibt die arktische Atmosphäre frei von fremden Einflüssen und zeigt ihren natürlichen Aerosolgehalt.

Gegen Ende des Herbstes beginnt sich die Polarfront dagegen nach Süden auf eine geografische Breite von etwa 55 Grad Nord zu verschieben. Dadurch geraten große Teile der Arktis einschließlich Spitzbergen in den Einflussbereich von Luftmassen, die eine Verbindung zu, wenn auch 2000 und mehr Kilometer

entfernten, anthropogenen Aerosolquellen herstellen. Innerhalb weniger Tage kann so Schmutz aus den Industriegebieten in hohe nördliche Breiten gelangen – von woher und wohin ist nur eine Frage der Strömungsdynamik.

Dennoch zeigten die ersten Messungen im Spätwinter keinen Dunstschleier – weder im Januar noch im Februar. Er erschien erst im März, als die Tage wieder hell waren. Das hieß, dass die Atmosphäre im arktischen Winter zumindest an einzelnen Orten zeitweise ebenso klar erschien wie im Sommer. Der Grund dafür war rätselhaft.

Allerdings musste für die Mondlichtmessungen die Vollmondphase abgewartet werden, die sich bekanntlich nur einmal im Monat einstellt. Damit waren auch die neuen Sondierungen zeitlich begrenzt. Da für die Polarnacht noch gar keine Informationen vorgelegen hatten, bedeuteten sie trotzdem einen Gewinn. Letzte Klarheit aber konnten erst lückenlose Untersuchungen während der gesamten dunklen Jahreszeit erbringen.

Dies erforderte, auch das Sternenlicht für Aerosolmessungen zu nutzen. Dazu musste die Empfindlichkeit des Detektors noch einmal um sechs Größenordnungen gesteigert werden – und zugleich die Linearität der Signalerfassung gewahrt bleiben. Trifft beim Sonnenlicht ein ununterbrochener Photonenstrom auf den Empfänger, so sind es bei einem Stern nur noch einzelne kurze Schauer.

Für die Aufnahme derart geringer Energieflüsse eignet sich im Prinzip nur ein Fotomultiplier – ein relativ kompliziertes Bauteil, das einen Energie-Impuls kaskadenartig verstärkt. Schon ein einziges Photon erzeugt darin einen messbaren Strom. Allerdings waren diese Detektoren bis vor kurzem noch mit aufwendigen Kühlanlagen umgeben, weil sie auf einer tiefen Temperatur gehalten werden mussten, und brauchten ein gewaltiges Teleskop, um das spärliche Licht zu bündeln. Deshalb kam Leiterer auf die Idee, statt dessen eine so genannte Avalanche-Diode zu nutzen. Dieses hochgezüchtete Silizium-Bauelement stellt geringere Ansprüche als ein Fotomultiplier, ist aber ebenfalls in der Lage, das elektronische Signal eines Photons lawinenartig zu verstärken.

Messungen mit Sternenlicht

Während der Kampagne „Star 96“ in Ny-Ålesund ließen sich so zum ersten Mal kontinuierlich Aerosolkonzentrationen sowohl mit dem Mond als auch mit Fixsternen als Lichtquelle bestimmen. Allerdings mussten zwei Sterne gleichzeitig angepeilt werden, und eine Messung dauerte relativ lange. Deshalb entschieden sich die Forscher schließlich doch für einen Fotomultiplier als Detektor, nachdem die Firma Hamamatsu eine handlichere Neuentwicklung angeboten hatte, die zudem hohe Langzeitstabilität versprach. Das verbesserte und verkürzte die Messungen. Außerdem ließen sie sich besser automatisieren, weil jetzt das Licht eines Sterns genügte.

Für die Jahre 1995/96 bis 1999/2000 wurden jeweils Aerosol-Daten für die Wintermonate Dezember bis Februar gesammelt. Den ersten kompletten Durchlauf vom ausklingenden Herbst über die Polarnacht bis zum Frühjahr unternahmen die Forscher im Winterhalbjahr 2000/2001.

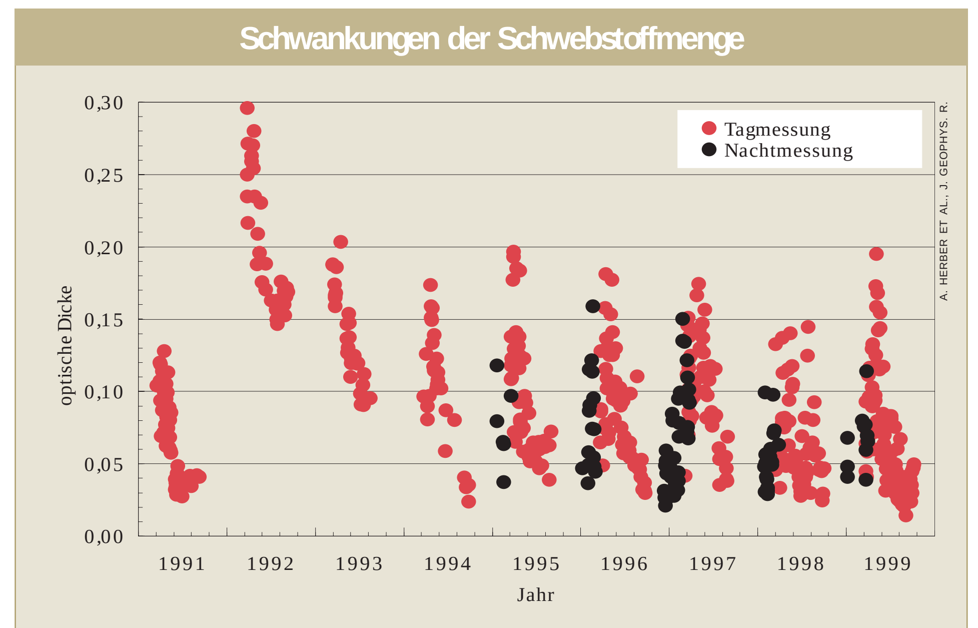
Bei diesen Messserien konnten auch vereinzelt Dunstschleier in der Polarnacht nachgewiesen werden – vor allem gegen Ende der dunklen Jahreszeit. Zu diesem Zeitpunkt waren sie immerhin bei einem Viertel der Messungen zu beobachten. Wirklich hohe Aerosolwerte traten aber erst im Frühjahr auf. Dann registrierte das Fotometer bei bis zu fünfzig Prozent der Messungen Schmutzschwaden in Luftschichten bis drei Kilometer Höhe. Die optische Dicke bei einer Wellenlänge von 500 Nanometern erreichte Werte von 0,2. Solche Aerosolkonzentrationen lassen sich mit denen in Industriegebieten Mitteleuropas vergleichen. Insgesamt zeigten die Untersuchungen, dass entgegen anders lautenden Vermutungen die Konzentration der arktischen Aerosole in den letzten zehn Jahren nicht zurückgegangen ist. ▶

D. NAGEL



S. DEBATIN

Höhenabhängige Messungen der Aerosolkonzentration bei Tageslicht wurden vom Flugzeug aus gemacht. Auf dem linken Foto bedient einer der Autoren (Andreas Herber) an Bord der „Polar 4“ bei einem Flug in der oberen Troposphäre die halbautomatische Variante eines Sonnenfotometers (im Hintergrund). Wegen der großen Höhe trägt er eine Atemmaske. Im oberen Foto führt Klaus Dethloff mit einem Fotometer des Aerologischen Observatoriums Lindenberg Aerosolmessungen durch.



Seit 1991 existiert eine mehr oder weniger kontinuierliche Serie von Messungen der optischen Dicke des Aerosols über Spitzbergen bei einer Wellenlänge von 532 Nanometern. Bis 1995 gibt es allerdings nur Messungen für den Sommer. Sie sind zudem beeinflusst durch den Ausbruch des Vulkans Pinatubo auf den Philippinen im Juni 1991. Die späteren Nachtmessungen wurden mit einem Mond- oder Sternfotometer durchgeführt. Zunächst fehlen noch Werte für die Monate Oktober bis Anfang Dezember – ein Zeitraum, in dem nur eine geringe Belastung vermutet wurde.

Bei einer optischen Dicke von 0,1 (bei 500 Nanometern) enthält die Luftsäule zehn Milligramm Aerosol pro Quadratmeter – unter der Annahme, dass es sich um Schwefelsäuretröpfchen handelt. Den bisher höchsten Wert im Nordpolarbereich hat Leiterer 1989 in der sibirischen Arktis gemessen: 0,32. Er entspricht einem Gesamtverlust an solarer Strahlung von etwa 37 Prozent. Beim Maximalwert von 0,2 über Spitzbergen gehen 30 Prozent des Sonnenlichts verloren und beim Minimalwert von 0,05, der in der Arktis vom Sommer bis zum Ende des Herbstes sowie ganzjährig in der Antarktis vorliegt, nur noch 15 Prozent. Allerdings werden auch in völlig klarer Luft durch die so genannte Rayleigh-Streuung an Luftmolekülen 12 Prozent der solaren Strahlung zurück ins All gelenkt. Beim Minimalwert der optischen Dicke sind also nur drei Prozent des Strahlungsverlustes den Aerosolen anzulasten.

Warum aber manifestieren sich die Aerosolmaxima erst im Frühjahr statt schon im Winter, wie die Atmosphärenphysiker zunächst angenommen hatten? Dafür gibt es offenbar mehrere Gründe. Zum einen ist die atmosphärische Zirkulation um Spitzbergen in der kalten Jahreszeit oft durch Nordost-Winde geprägt, die Luft aus unberührten Polarregionen heranführen und zugleich für eine intensive Durchmischung der Atmosphäre sorgen. Zum anderen sind die Emissionen der Industrie im Allgemeinen zunächst gasförmig und damit unsichtbar. Aerosolpartikel, die den Himmel trüben, bilden sich daraus erst nachträglich durch eine fotochemische Reaktion. Diese kommt nicht richtig in Gang, solange noch allgemeine Dunkelheit herrscht. Wenn aber im Frühjahr die ersten Sonnenstrahlen auf die industriellen Gase einwirken, transformieren sie die schon länger vorhandene Luftverschmutzung plötzlich in sichtbare graubraune Aerosol-Schleier: eben den arktischen Dunst – definiert durch eine spektrale optische Dicke um oder über 0,1.

Arktischer Dunst verstärkt die Erwärmung am Nordpol

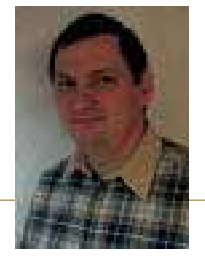
Auch nachdem Ursprung und Entstehungsmechanismus dieses Phänomens geklärt sind, bleibt allerdings eine andere Frage umstritten: Wie wirkt sich der arktische Dunst auf das Klima aus? Im globalen Mittel haben Aerosole, wie Modellrechnungen verschiedener Institute ergaben, einen abkühlenden Effekt: Sie schwächen den anthropogenen Treibhauseffekt ab.

Unter arktischen Verhältnissen gestalten sich die Strahlungsvorgänge aber komplizierter als in mittleren Breiten. Man muss schon die vielen Komponenten einzeln im Detail untersuchen, um die Frage nach der Klimawirkung beantworten zu können. Je nachdem wie groß die Aerosolteilchen sind, welche chemische Zusammensetzung und Form sie haben und ob die Unterlage Schnee, erodiertes Eis oder Wasser ist, wird die einfallende Sonnenstrahlung unterschiedlich stark gestreut oder absorbiert.

Da die Eisoberfläche mit ihrer hohen Albedo einen Großteil des auftreffenden Lichtes reflektiert, kommt es in der polaren Atmosphäre zur Mehrfachstreuung zwischen Oberfläche und Aerosol. Das erzeugt quasi ein Überangebot an Strahlung, die von den Aerosolpartikeln absorbiert werden kann, sodass die Dunstpartikel unter bestimmten Umständen vielleicht die Atmosphäre eben doch aufheizen, statt sie abzukühlen. Dann würde der Arctic Haze den Treibhauseffekt in der Nordpolarregion sogar verstärken.

Erste Rechnungen am Alfred-Wegener-Institut mit den neuen Daten bestätigen diese Vermutung. Danach sollte das anthropogene Aerosol in der Arktis tatsächlich eher einen erwärmenden als abkühlenden Effekt haben. Mit einer eigenen Messkampagene – ASTAR 2000 (*Arctic Study of Tropospheric Aerosol and Radiation*) – sind AWI-Wissenschaftler in Kooperation mit dem japanischen Polarforschungsinstitut dieser Frage im Frühjahr 2000 nachgegangen.

Dabei hat sich erwiesen, dass die Schwebteilchen zwar auch in der Arktis lokal vereinzelt abkühlend wirken; in der Summe aber heizen sie die Troposphäre im Nordpolargebiet auf. Das könnte dazu führen, dass das Meereis dort schneller schmilzt als erwartet. Auswirkungen auf den Meeresspiegel hätte dies zwar nicht. Letztlich wäre aber auch die Inlandeisdecke Grönlands betroffen und deren allmähliches Abschmelzen würde die Meere sehr wohl anschwellen lassen.




Andreas Herber *(links) ist promovierter Atmosphärenphysiker und betreut am Afred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven die fotometrischen Aerosolmessungen.* ***Gert Lange*** *ist freier Wissenschaftsjournalist in Berlin. Er schreibt bevorzugt über Polarforschung.*

Die Entstehung der Galaxis

Mit dem Spürsinn von Kriminologen erschließen Astrophysiker, wie sich unser Milchstraßensystem einst aus einer diffusen Gaswolke herausgebildet hat. Als wichtigstes Indiz dient ihnen die räumliche Verteilung der chemischen Elemente.

Von Cristina Chiappini

Unser Milchstraßensystem, die Galaxis, ist wie Abermilliarden anderer Welteninseln im All eine flache Scheibe mit prächtig leuchtenden Spiralarmen. Offenbar nehmen die meisten Sternsysteme unter dem Einfluss der Naturgesetze diese Form an. Die komplexe Struktur der Spiralgalaxien hat sich im Laufe ihrer über zehn Milliarden Jahre langen Entwicklungsgeschichte herausgebildet und ist sowohl von Ordnung als auch von Chaos geprägt. Dies ist umso erstaunlicher, als am Anfang dieses Prozesses sehr wahrscheinlich nur eine diffuse, strukturlose Ansammlung von Gas stand. Was sich im Laufe der Entwicklung genau ereignet hat, ist noch nicht völlig geklärt. Astrophysiker wie ich konstruieren theoretische Modelle, um aus dem heutigen Erscheinungsbild der Galaxis auf ihre Entwicklungsgeschichte schließen zu können.

Diese Modelle müssen nicht nur die Gravitationskräfte mit ihrer unendlichen Reichweite berücksichtigen, sondern auch die auf atomarer Ebene ablaufenden Wandlungsprozesse. Das Gas, aus dem unser Milchstraßensystem hervorgegangen ist, bestand aus Wasserstoff und Helium sowie einer Spur Lithium – aus jenen Elementen also, die der Urknall hinterlassen hat. Alle anderen Atomsorten sind erst im Laufe der Zeit durch Kernfusionsprozesse in Sternen entstanden. Diesen Glutöfen gelingt seit Urzeiten, woran die mittelalterlichen Alchimisten scheiterten: die Erzeugung neuer Elemente aus einfachen Grundstoffen. Bis heute haben die Sterne erst zwei Prozent des kosmischen Wasserstoff- und Heliumvorrats in schwerere Elemente umgewandelt und daraus ihre Leuchtkraft gespeist. Aber die räumliche Verteilung dieser zwei Prozent birgt, so hoffen wir, den Schlüssel zu den Geheimnissen der Entstehung und Entwicklung des Milchstraßensystems.

Allerdings müssen die Forscher noch eine Vielzahl weiterer empirischer Befunde als Randbedingungen in ihre Modelle einfließen lassen, um die Entwicklung einer Galaxie beschreiben zu können: etwa die Gasdichte in den verschiedenen Komponenten der Scheibe, die Häufigkeit, mit der Sterne entstehen und vergehen, die genaue chemische Zusammensetzung unserer Sonne sowie die Entstehungsrate schwerer Elemente in den Sternen. Die schwierige Aufgabe liegt darin, ein Modell zu finden, das möglichst viele dieser Randbedingungen erfüllt.

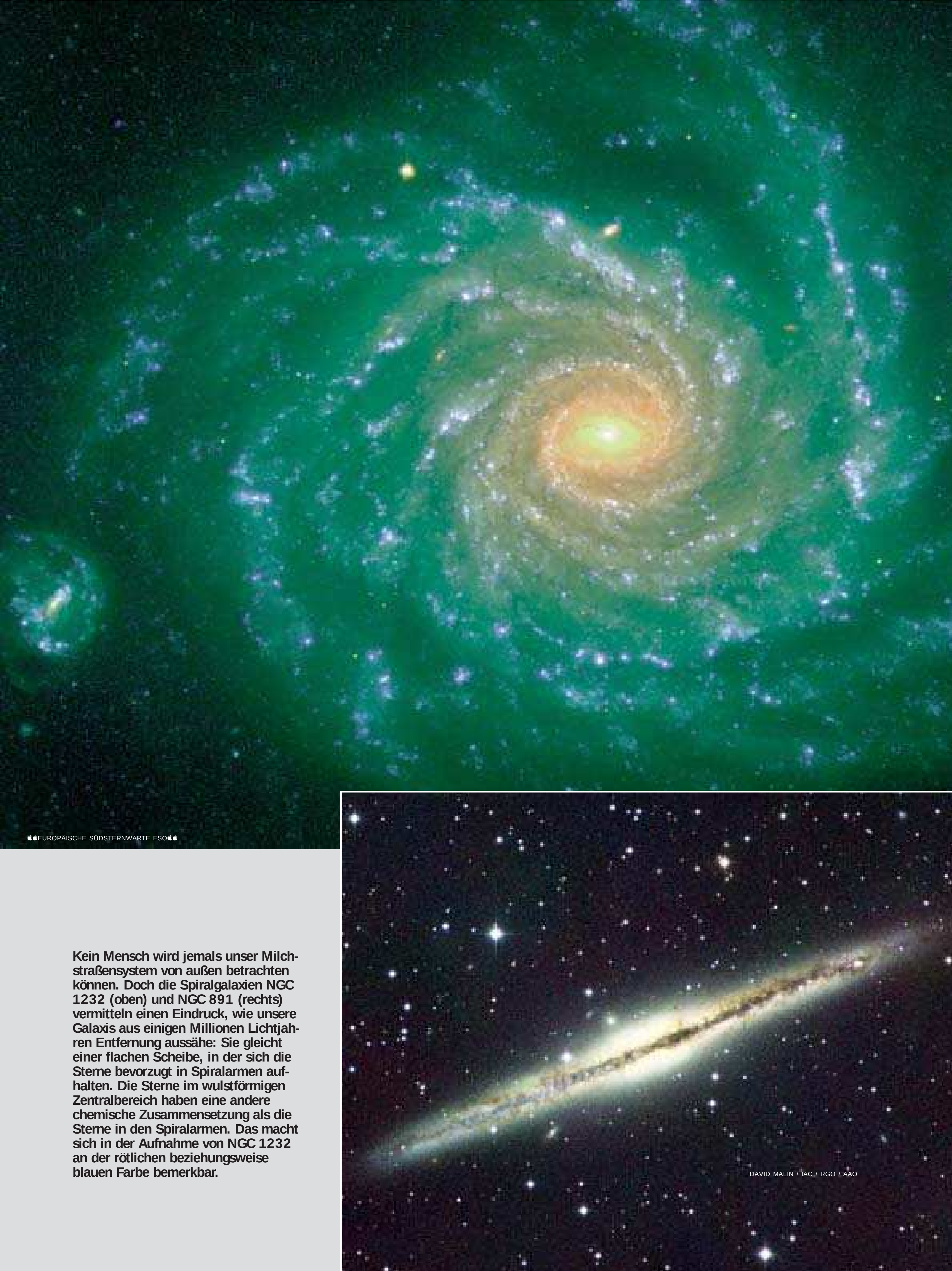
Anatomie-Stunde

In diesem Artikel stelle ich ein neues Modell vor, das die meisten der jüngsten Beobachtungen berücksichtigt. Aber wenngleich neue Technologien die Qualität der Beobachtungen stetig verbessern und so die Randbedingungen verfeinern, sind wir doch noch weit davon entfernt, die Entwicklung der Galaxis vollständig zu verstehen.

Ähnlich wie wir den Körper des Menschen in Torso, Kopf und Gliedmaßen unterteilen, so können wir auch das Milchstraßensystem in eine Reihe von Komponenten gliedern. Der auffälligste Teil der Galaxis ist die Scheibe mit ihren Spiralarmen. Im Zentralbereich weist sie eine Verdickung auf, die von den Forschern Bulge (englisch für „Wulst“) genannt wird. Die Scheibe selbst lässt sich wiederum in eine so genannte dünne Scheibe von etwa 2000 Lichtjahren Stärke und in eine 7000 Lichtjahre starke dicke Scheibe untergliedern (siehe Grafik Seite 40). Da die Scheibe einen Durchmesser von rund 120 000 Lichtjahren hat, handelt es sich insgesamt um ein ausgesprochen flaches Gebilde. Unsere Sonne befindet sich in der dünnen Scheibe, und zwar in einer Entfernung von etwa 28 000 Lichtjahren vom galaktischen Zentrum.

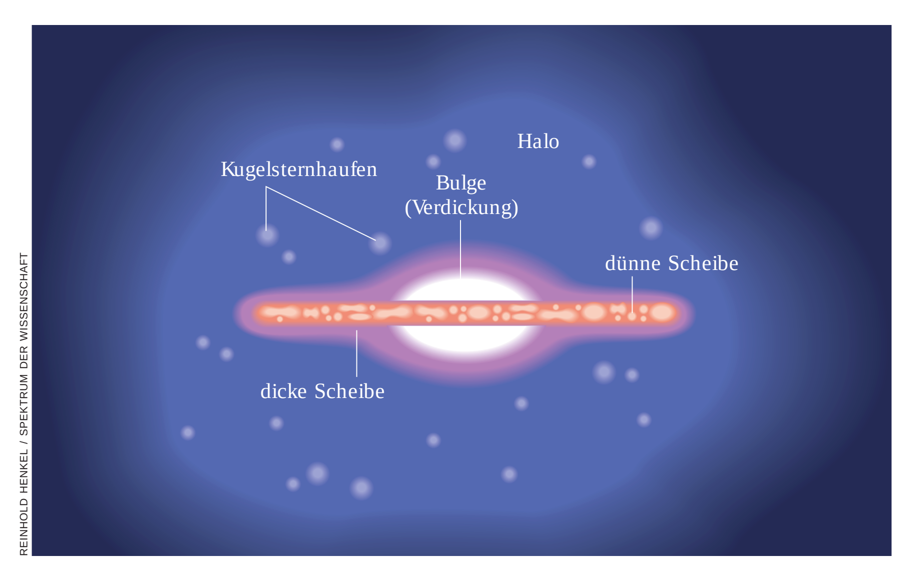
Der Halo, eine sphärische Komponente, welche die Scheibe und ihre zentrale Verdickung komplett umhüllt, ist auf Bildern von Spiralgalaxien meist nicht oder nur sehr schwach zu erkennen. Das liegt einerseits daran, dass der überwiegende Teil des Halos aus Dunkler Materie besteht – Material unbekannter Zusammensetzung, das kein Licht aussendet oder absorbiert, sich aber durch seine starke Schwerkraft verrät. Trotzdem besitzt der Halo eine stellare Komponente, oft stellarer Halo genannt, die aber zu leuchtschwach ist, um leicht erkennbar zu sein. Innerhalb des Halos gibt es jedoch Objekte, die sehr wohl im Teleskop sichtbar sind: etwa 200 Kugelsternhaufen mit jeweils etwa einer Million Mitgliedern. Diese sphärischen Ansammlungen von Sternen gehören zu den ältesten Gebilden in der Galaxis.

Viele Jahrzehnte sorgfältiger Studien waren nötig, um die verschiedenen Komponenten des Milchstraßensystems voneinander zu unterscheiden, und noch ▶

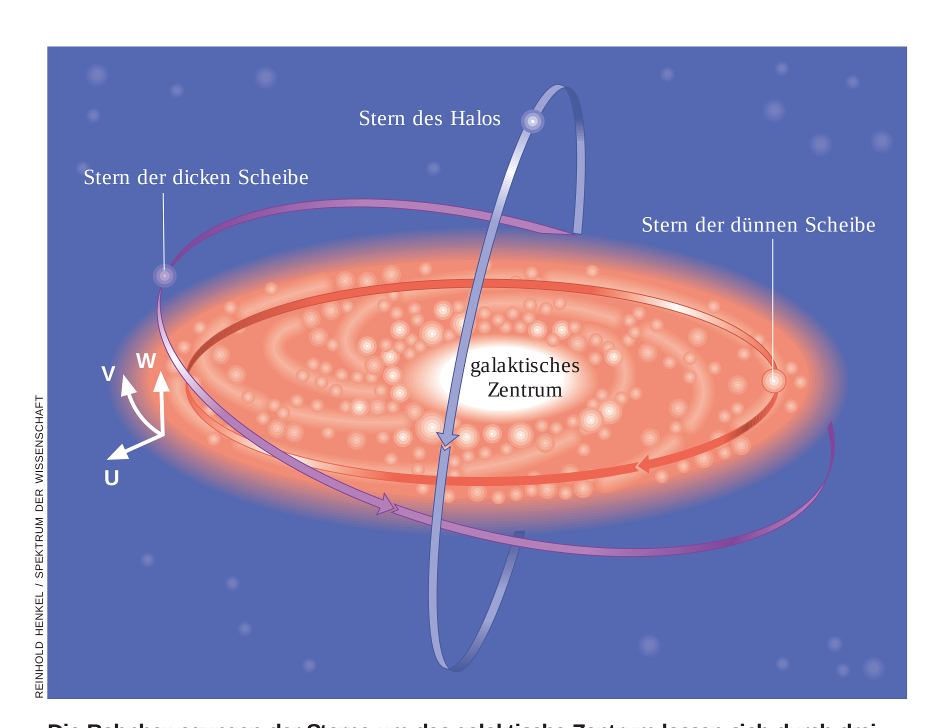


Kein Mensch wird jemals unser Milchstraßensystem von außen betrachten können. Doch die Spiralgalaxien NGC 1232 (oben) und NGC 891 (rechts) vermitteln einen Eindruck, wie unsere Galaxis aus einigen Millionen Lichtjahren Entfernung aussähe: Sie gleicht einer flachen Scheibe, in der sich die Sterne bevorzugt in Spiralarmen aufhalten. Die Sterne im wulstförmigen Zentralbereich haben eine andere chemische Zusammensetzung als die Sterne in den Spiralarmen. Das macht sich in der Aufnahme von NGC 1232 an der rötlichen beziehungsweise blauen Farbe bemerkbar.

immer gibt es feinere Substrukturen zu entdecken. Warum ist es so aufwendig, unsere Heimatgalaxie zu erkunden? Es liegt an ihrer schieren Größe: Einen genauen Blick können die Astronomen nur auf die Sterne in der Sonnenumgebung werfen. Und da wir in der dünnen Scheibe residieren, entziehen sich die Sterne der dicken Scheibe und des Halos überwiegend einer detaillierten Untersuchung. Nur solche Objekte der galaktischen Außenregionen, die auf Grund ihrer Bahnbewegung um das galaktische Zentrum zufällig gerade die dünne Scheibe passieren, offenbaren ausreichend viele Informationen.



Neben der Scheibe, der zentralen Verdickung und dem umhüllenden Halo lassen sich je nach chemischer Zusammensetzung und Bahndynamik der Sterne noch Unterregionen im Milchstraßensystem unterscheiden. Im Mittel sind die Sterne in der dünnen Scheibe stärker mit schweren Elementen angereichert als diejenigen in der dicken Scheibe, im Zentralwulst und im Halo.



Die Bahnbewegungen der Sterne um das galaktische Zentrum lassen sich durch drei Geschwindigkeitskomponenten beschreiben: die Rotationsgeschwindigkeit V, die Radialgeschwindigkeit U und die zu beiden senkrechte Komponente W. Je nach Zugehörigkeit der Sterne zur dünnen Scheibe, zur dicken Scheibe oder zum Halo unterscheiden sich die Werte dieser Geschwindigkeitskomponenten.

Auf solchen mühsam zusammengetragenen Beobachtungen fußen die Entwicklungsmodelle. Für diese wird als Sonnenumgebung meist ein Zylinder mit einem Radius von 3000 Lichtjahren verwendet, in dessen Zentrum sich unsere Sonne befindet. Die Höhe des Zylinders ist unbegrenzt, damit er nicht nur einen Ausschnitt der dünnen Scheibe, sondern auch Teile der dicken Scheibe und des Halos enthält.

Es sind gerade die unterschiedlichen Umlaufbahnen, die kinematischen Eigenschaften der Sterne also, die ihre Zuordnung zu den unterschiedlichen Komponenten der Galaxis ermöglichen. Die Bahnbewegung eines Sterns wird durch drei Geschwindigkeitskomponenten beschrieben:

➤ seine Radialgeschwindigkeit (U) in der Scheibenebene vom galaktischen Zentrum fort,

➤ seine Rotationsgeschwindigkeit (V) in Richtung der allgemeinen galaktischen Drehbewegung und

➤ seine Vertikalgeschwindigkeit (W) senkrecht zur galaktischen Ebene.

Sterne der dünnen Scheibe, wie etwa unsere Sonne, haben eine geringe Vertikalgeschwindigkeit und bleiben deshalb zumeist in der galaktischen Ebene. Sterne der dicken Scheibe weisen etwas höhere und Halosterne noch höhere Vertikalgeschwindigkeiten auf. Dafür ist die Rotationsgeschwindigkeit der Halosterne fast null. Anhand der kinematischen Eigenschaften eines Sterns kann ein Astronom also erkennen, ob dieser Himmelskörper wirklich zu der Komponente des Milchstraßensystems gehört, in der er sich gerade befindet, oder ob es sich quasi um einen „Durchreisenden“ aus einer anderen Gegend der Galaxis handelt.

Die Sterne der Scheibe und diejenigen des Halos unterscheiden sich aber noch in anderer Hinsicht, weshalb die Astronomen auch von verschiedenen Sternpopulationen sprechen. Diesen Begriff prägte 1944 der deutsche Astronom Walter Baade, der seit 1931 am Mount-Wilson-Observatorium in Kalifornien arbeitete. Mit dem dortigen 2,5-Meter-Teleskop gelang es ihm erstmals, die Zentralregion des Andromeda-Nebels – einer dem Milchstraßensystem benachbarten Galaxie – in Einzelsterne aufzulösen. Dabei erkannte Baade, dass dort sowie im Halo und in den Kugelsternhaufen überwiegend rötliche Sterne vorhanden sind, während die meisten Sterne in den Spiralarmen bläulich leuchten. Die blauen Sterne ordnete er einer Population I zu, die roten einer Population II.

Baades einfaches Schema – das inzwischen verfeinert worden ist, um diverse Übergangspopulationen zu berück-

sichtigen – revolutionierte damals die stellare Astronomie und gab diesem Forschungsfeld enormen Aufschwung. Und zwar deshalb, weil sich hinter dem Farbunterschied ein grundlegender Unterschied in der Art und der Entwicklung der Sterne verbirgt. Die Analyse des Sternenlichts zeigte, dass Sterne der Population I relativ reich an Elementen schwerer als Helium sind. Sterne der Population II, insbesondere jene des Halos und der Kugelsternhaufen, sind dagegen relativ arm an schweren Elementen (von den Astronomen häufig, aber unzutreffend „Metalle“ genannt).

Das Ausmaß der Anreicherung schwerer Elemente in der äußeren Schicht eines Sterns lässt sich aus seinem Spektrum ermitteln. Die Astronomen nehmen an, dass die äußere Schicht die chemische Zusammensetzung der Gaswolke widerspiegelt, aus welcher der Stern entstanden ist. Denn die vom Stern selbst im Innern erzeugten schweren Elemente dringen üblicherweise kaum nach außen vor. Diese Annahme konnten die Forscher für jene Sterne empirisch bestätigen, bei denen zusätzlich die Anreicherung schwerer Elemente im interstellaren Gas der Sternumgebung direkt gemessen wurde.

Die Asche von Sternen verändert die Chemie der Galaxis

Ein ungefähres Maß für die Anreicherung eines Sterns mit schweren Elementen ist die Häufigkeit des Elementes Eisen (Fe) im Vergleich zur Häufigkeit von Wasserstoff (H). Der metallärmste Stern, der in der Galaxis bislang bekannt ist, befindet sich im Halo. Er ist alt und enthält nur ein Zehntausendstel des Eisenanteils in unserer Sonne. Dass es sich dabei um einen uralten Stern handelt, ist kein Zufall. Als er entstand, hatte die Synthese schwerer Elemente erst kurz zuvor eingesetzt; es gab also schlicht noch keine großen Mengen davon, die der Stern bei seiner Entstehung hätte aufnehmen können. Als Faustregel gilt: Die Eisenhäufigkeit im interstellaren Gas hat im Zuge der Entwicklung unserer Galaxis zugenommen, alte Sterne sind demnach in ihren äußeren Schichten eisenärmer als junge.

Wie Sterne schwere Elemente herstellen, ist heute weitgehend bekannt. Die meisten werden durch eine Kette von Fusionsreaktionen aus leichteren Elementen aufgebaut. Es gibt dabei eine ganze Reihe von physikalischen Vorgängen, aus denen jeweils ein anderes Sortiment an Elementen hervorgeht. Wann und mit welcher Intensität diese Prozesse jeweils ablaufen, hängt hauptsächlich von der Masse des Sterns ab. Die ▶

Alchemisten des Alls

Wie explodierende Sterne schwere Elemente erzeugen

Schwere Elemente gelangen auf dreierlei Weise in das interstellare Medium:

➤ Sterne niedriger oder mittlerer Masse wie unsere Sonne stoßen am Ende ihres Entwicklungsweges ihre äußeren Schichten ab, die vor allem Kohlenstoff und Stickstoff enthalten. Für einige tausend Jahre sind diese Sternenhüllen als so genannte Planetarische Nebel sichtbar – wie hier im Foto der Hantelnebel M27, der rund 650 Lichtjahre von der Sonne entfernt ist.

➤ Massereiche Sterne explodieren nach wenigen Millionen Jahren als Supernovae vom Typ II. Dadurch wird das interstellare Medium vor allem mit Sauerstoff, Magnesium, Schwefel und Silizium angereichert.

➤ Enge Doppelsternsysteme, die aus einem Weißen Zwerg und einem Riesenstern bestehen, explodieren nach rund einer Milliarde Jahren als Supernovae des Typs Ia. Dann nämlich hat sich der Riesenstern so weit aufgebläht, dass Masse von ihm auf den Zwergstern überströmt. Dieser wird schließlich instabil und schleudert vor allem Eisen in den interstellaren Raum.

Weil diese drei Prozesse auf unterschiedlichen Zeitskalen ablaufen, können die Astronomen aus der relativen Häufigkeit schwerer Elemente in einer bestimmten Region des Milchstraßensystems auf deren Alter schließen.



EUROPÄISCHE SÜDSTERNWARTE ESO

Supernova vom Typ II **Supernova vom Typ Ia**

Sauerstoff
Magnesium
massereicher Stern
Silizium
Schwefel
Eisen
Spuren anderer Elemente
Weißer Zwerg
Roter Riese

REINHOLD HENKEL / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

leichtesten Sterne – von denen einige nur ein Zehntel der Masse unserer Sonne aufweisen – haben die höchste Lebenserwartung, bis zu einigen hundert Milliarden Jahren. Im Gegensatz dazu sehen schwere Sterne, die bis zu 150 Sonnenmassen enthalten können, nur einem vergleichsweise kurzen Leben von wenigen Millionen Jahren entgegen. Dieser Unterschied ist wichtig, weil Sterne am Ende ihres Daseins einen wesentlichen Anteil der neu erschaffenen Elemente an die interstellare Materie abgeben.

Die Masse eines Sterns bestimmt nicht nur seine Lebensdauer, sondern auch die Art von chemischen Elementen, die er an das interstellare Gas abgibt und damit der nachfolgenden Sterngeneration zur Verfügung stellt (siehe Kasten auf Seite 41). Da die Lebenserwartung der extrem massearmen Sterne das Alter des Milchstraßensystems – etwa 14 Milliarden Jahre – weit übersteigt, haben sie bisher kaum zur chemischen Evolution der Galaxis beigetragen. Sterne niedriger und mittlerer Masse wie unsere Sonne blähen sich gegen Ende ihres Entwicklungsweges zu Roten Riesen auf, um sodann ihre äußere Hülle in das interstellare Medium hinauszublasen. Solche ehemaligen Sternenhüllen sind als so genannte Planetarische Nebel sichtbar. Sie enthalten vor allem Helium-4, Kohlenstoff und Stickstoff. Diese Nebel dehnen sich immer weiter aus, bis sie sich bereits nach weniger als einer Million Jahren mit dem interstellaren Gas vermischt haben (siehe „Planetarische Nebel", Spektrum der Wissenschaft 7/92, Seite 60).

Sterne mit mehr als der achtfachen Sonnenmasse entwickeln sich zunächst ebenfalls zu Roten Riesen, aber ihr Dasein beenden sie auf noch spektakulärere Weise: Sie explodieren als Supernovae vom Typ II. Die Explosionswolken reichern das Milchstraßensystem mit einer Vielzahl von Elementen an, darunter hauptsächlich Sauerstoff und andere so genannte Alpha-Elemente: Neon, Magnesium, Silizium und Schwefel, die aus der Verschmelzung von Alpha-Teilchen, also Helium-4-Kernen, entstanden waren.

Es gibt noch andere Supernovae, solche vom Typ Ia, die das interstellare Gas signifikant mit Elementen anreichern. Im Unterschied zum Typ II, wo sich ein einzelner massereicher Stern aufbläht und explodiert, handelt es sich beim Typ Ia um ein Doppelsternsystem, bei dem sich ein Weißer Zwerg und ein Stern mittlerer Masse auf engen Bahnen umkreisen. Sobald der zweite Stern allmählich zu einem Roten Riesen anschwillt, entzieht die Schwerkraft des Weißen Zwerges der äußeren Hülle seines Begleiters nach und nach einen beträchtlichen Teil der Materie. Irgendwann hat der Weiße Zwerg so viel zusätzliches Gas aufgenommen, dass er unter seinem eigenen Gewicht kollabiert. Dadurch kommt es zu einer thermonuklearen Explosion, eben der Supernova vom Typ Ia, die den größten Teil der Sternmaterie in das Weltall schleudert: hauptsächlich Eisen, aber auch Schwefel, Silizium und Kalzium.

Solche Explosionen haben etwa siebzig Prozent des Eisens geliefert, das heute in der Galaxis nachweisbar ist. Will man die allmähliche Anreicherung der interstellaren Materie mit Eisen im Modell nachvollziehen, so ist zu berücksichtigen, dass die Entstehungsrate des Eisens entscheidend von zwei Größen abhängt: von der Gesamtzahl solcher Doppelsternsysteme und von den typischen Massen der Roten Riesen darin. Denn diese Massenwerte bestimmen, nach welcher Zeit das Eisen freigesetzt wird: Sterne mit dem Achtfachen der Sonnenmasse blähen sich schon nach rund 30 Millionen Jahren zu einem Roten Riesen auf. Sonnenähnliche Sterne hingegen erreichen diese Phase erst nach etwa zehn Milliarden Jahren.

Eisen als Indikator

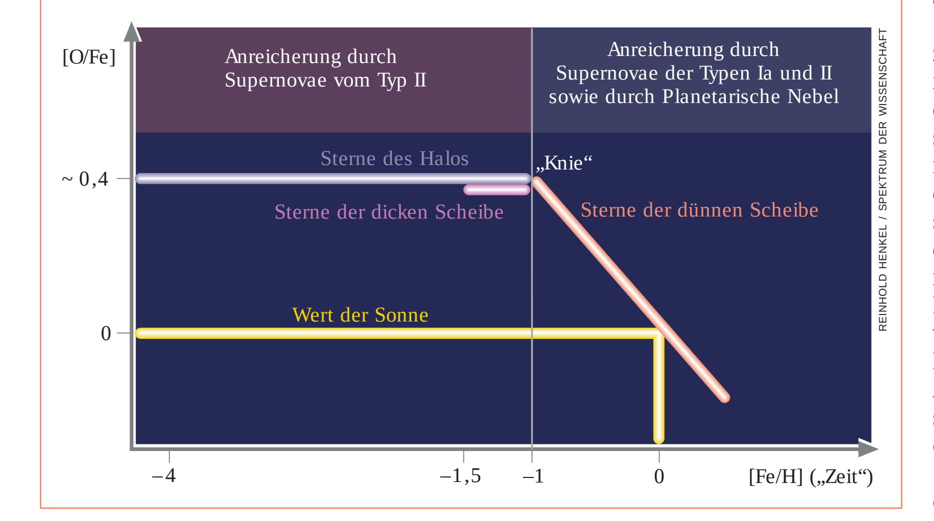
Wie die Chemie die Entwicklungsgeschichte erschließt

Ein ungefähres Maß für die Anreicherung eines Sterns mit schweren Elementen ist die Häufigkeit von Eisen (Fe) im Vergleich zur Häufigkeit von Wasserstoff (H). Dabei beziehen die Astronomen diese Daten für die Sterne üblicherweise auf die Werte unserer Sonne als Referenz und geben den Zehnerlogarithmus des Verhältnisses an:

$$[Fe/H] = \log(Fe/H) - \log(Fe/H)_{Sonne}$$

Der metallärmste Stern, der in der Galaxis bislang bekannt ist, befindet sich im Halo. Er ist alt und hat auf dieser logarithmischen Skala eine Eisenhäufigkeit [Fe/H] von −4, was einem Zehntausendstel des Wertes unserer Sonne entspricht. Allgemein hat die Eisenhäufigkeit im interstellaren Gas im Zuge der Entwicklung unserer Galaxis zugenommen, sodass sie als Basis dienen kann, um die relative Häufigkeit zweier Elemente – wie etwa das Verhältnis Sauerstoff (O) zu Eisen – in Abhängigkeit von der Zeit aufzutragen. Für metallarme Sterne (für die [Fe/H] kleiner als –1 ist) ergibt sich ein konstantes Niveau von [O/Fe]. Etwa eine Milliarde Jahre nach Entstehung der Galaxis beginnen Supernovae des Typs Ia, den Eisenanteil zu erhöhen, sodass die Kurve für [O/Fe] bei einem „Knie" nach unten abknickt.

Sterne des Halos und ein Teil der Sterne in der dicken Scheibe belegen nach Beobachtungsdaten das waagrechte Stück der Kurve, während Sterne der dünnen Scheibe auf dem abfallenden Stück zu liegen kommen. Daraus schließen die Astronomen, dass der Halo und ein Teil der dicken Scheibe in der ersten Jahrmilliarde der Galaxis entstanden und dass sich die dünne Scheibe erst danach bildete.



Weil Sterne unterschiedlicher Masse nicht mit gleicher Wahrscheinlichkeit entstehen, muss dies in den Modellrechnungen berücksichtigt werden. Sterne ähnlich unserer Sonne beispielsweise sind 150-mal häufiger als solche mit der 30fachen Sonnenmasse. Berücksichtigt man diese Wahrscheinlichkeitsverteilung, so folgt, dass Doppelsternsysteme im Mittel eine Milliarde Jahre benötigen, bis es zu einer Supernova-Explosion vom Typ Ia kommt. Folglich reichert sich die Galaxis eher langsam mit Eisen an.

Die unterschiedlichen Zeitskalen, mit denen die drei beschriebenen Prozesse – Bildung Planetarischer Nebel, Supernovae der Typen Ia und II – neugebildete Elemente im Raum verteilen, liefern uns nun wichtige Anhaltspunkte für die Entwicklung des Milchstraßensystems.

Was die Chemie über Halo und Scheibe verrät

Wir wissen jetzt, dass sich das interstellare Medium recht schnell mit solchen Elementen anreichert, die kurzlebige, also massereiche Sterne produzieren. Die Anreicherung mit Elementen, die von Typ-Ia-Supernovae und von Sternen niedriger oder mittlerer Masse stammen, erfolgt langsamer. Deshalb lässt sich das Verhältnis zweier Elemente, etwa Sauerstoff (O) und Eisen (Fe), die dem interstellaren Medium auf unterschiedlichen Zeitskalen zugeführt werden, als Indikator für das Alter der betreffenden Komponente der Galaxis nutzen.

Durch die Messung der Eisenhäufigkeit einer untersuchten Sternpopulation erschließt sich, wie oben dargestellt, in welchem Ausmaß sich die schweren Elemente bereits angereichert haben. Das gemessene Verhältnis Sauerstoff zu Eisen enthüllt dann, wann sich diese Population gebildet hat.

In der frühen Entwicklungsphase der Galaxis hatten die Hauptproduzenten des Eisens, die Supernovae vom Typ Ia, ihren Beitrag noch nicht geleistet, denn die zugehörigen Doppelsternsysteme brauchen im Mittel eine Milliarde Jahre, bis sie ihr Endstadium erreicht haben. Für das Verhältnis Sauerstoff zu Eisen erwarten wir also in der Frühphase der Galaxis einen nahezu konstanten Wert, weil diese Elemente anfangs mit gleicher Rate in Supernovae vom Typ II entstehen. Wenn aber die Supernovae vom Typ Ia ebenfalls Eisen zu produzieren beginnen, dann sollte das Verhältnis Sauerstoff zu Eisen sinken (Kasten auf Seite 42).

Und was ergibt sich nun, wenn wir uns die Beobachtungsergebnisse ansehen? Das Resultat ist interessant: Ein etwa konstantes Niveau zeigen die Sterne im Halo und diejenigen in der dicken Scheibe, während die Sterne der dünnen Scheibe den abfallenden Ast der Relation besetzen. Der Punkt, an dem die Kurve abknickt, das so genannte Knie, ist ein wichtiger Indikator für die Epoche, in der die Typ-Ia-Supernovae mit der Produktion von Eisen begonnen haben. Weil es gut eine Milliarde Jahre bis zu dieser Epoche gedauert hat, wissen wir, dass sich der Halo bereits bis zu diesem Zeitpunkt gebildet haben muss; die Sterne in ▶

Das „ELS-Modell“

Anfang der 60er Jahre entwickelten Olin Eggin, Donald Lynden-Bell und Allan Sandage ein grundlegendes Modell, wie die Galaxis entstanden sein könnte. Diesem „ELS-Modell“ zufolge bildete sich das Milchstraßensystem durch den raschen Kollaps einer einzelnen Gaswolke. Sterne, die in einer frühen Phase des Kollapses entstanden, behielten die Dynamik des metallarmen Gases bei und kreisen nun auf elliptischen Bahnen innerhalb des Halos um die Galaxis. Im weiteren Verlauf des Kollapses bildete sich eine Scheibe heraus, deren Material bereits angereichert war durch schwere Elemente, die in den ersten Generationen der Halosterne synthetisiert wurden.

REINHOLD HENKEL / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

der dünnen Scheibe hingegen sind wesentlich später entstanden. Für Sterne im Zentralgebiet der Galaxis, dem Bulge, gibt es bisher nur wenige Messungen der Elementhäufigkeiten, aber diese Messpunkte liegen ebenfalls auf dem konstanten Ast der Kurve. Auch die zentrale Verdickung des Milchstraßensystems ist demnach bereits in der Frühzeit der Galaxis entstanden.

Der Halo ist also alt und wird von alten, metallarmen Sternen bevölkert. Warum aber gibt es dort keine jungen Sterne wie diejenigen der Population I? Sie fehlen im Halo, weil ihr Rohstoff, das interstellare Gas, bereits aufgebraucht ist. In der galaktischen Scheibe hingegen gibt es noch Unmengen an Gas, und deshalb entstehen dort noch heute beständig neue Sterne. Dieser Unterschied ist wichtig für die Modelle der chemischen Evolution des Milchstraßensystems.

Allerdings verstehen wir nicht ganz, weshalb die galaktische Scheibe noch immer in einer Phase der Sternentstehung ist. Ein Erklärungsversuch ist die Annahme, dass kontinuierlich Gas von außen in die Scheibe einfällt – und so Material zur Sternentstehung nachliefert.

Die entgegengesetzte Vorstellung, zumeist „einfaches Modell" genannt, sieht die Galaxis als eine Art geschlossenes System, in das weder etwas hinein noch etwas aus ihm heraus kann. Das einfache Modell kennt also keinen Gaszustrom. Es steht allerdings im Widerspruch zu dem, was die Astronomen das G-Zwerg-Problem nennen. G-Zwerge sind, wie ihr Name schon andeutet, kleine Sterne. Wegen ihrer geringen Masse können sie viele Milliarden Jahre leuchten. Einige stammen aus der frühesten Epoche des Milchstraßensystems. Falls nun die Masse der galaktischen Scheibe im Laufe der Entwicklung der Galaxis



Nach dem Modell von Leonard Searle und Robert Zinn soll das Milchstraßensystem aus einer Ansammlung von Wolkenfragmenten entstanden sein. Damit würden sich die beobachteten Unterschiede in der Anreicherung schwerer Elemente in den Kugelsternhaufen erklären lassen. Denn jeder der protogalaktischen Bausteine hätte eine andere Entwicklungsgeschichte.

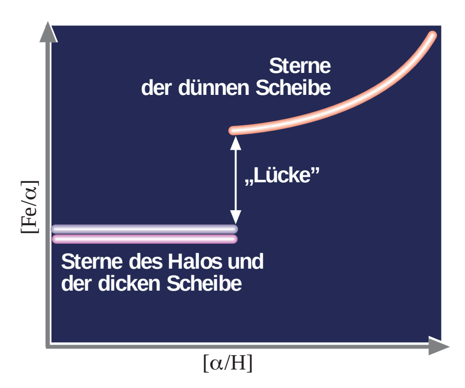
konstant geblieben wäre, sollte es in der Sonnenumgebung eine recht große Anzahl metallarmer G-Zwerge geben – einfach, weil das Gas, aus dem diese Sterne hervorgingen, anfangs kaum schwere Elemente enthielt. Tatsächlich gibt es jedoch nur wenige gering angereicherte G-Zwerge in der Umgebung der Sonne. Ein Weg, diesen Widerspruch zu lösen, ist die Annahme, dass die galaktische Scheibe ursprünglich weniger Masse enthielt als heute. Mit der Zeit wuchs ihre Masse durch den Einfall von Gas an.

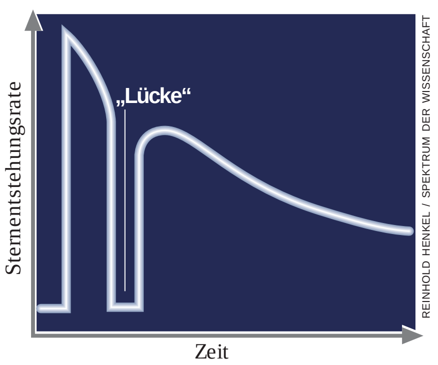
Das einfache Modell scheitert also an den G-Zwergen; realistische Modelle der Entwicklung des Milchstraßensystems müssen demnach komplizierter sein und den Zustrom von Materie in die galaktische Scheibe berücksichtigen.

Den Urtyp aller Modelle zur Entstehung des Milchstraßensystems entwickelten Anfang der 60er Jahre die drei Astronomen Olin Eggen, Donald Lynden-Bell und Allan Sandage. Ihre Veröffentlichung von 1962 wird heute nach den Initialen der Autoren kurz mit ELS bezeichnet. Das ELS-Modell basiert auf den relativen Geschwindigkeiten und der chemischen Zusammensetzung der Sterne der Populationen I und II. Wie ich schon beschrieben habe, sind die Sterne der Population I relativ reich an schweren Elementen, und sie bewegen sich auf Umlaufbahnen innerhalb der galaktischen Scheibe. Im Gegensatz dazu folgen die gering angereicherten Sterne der Population II elliptischen Bahnen, welche die Ebene der Galaxis kreuzen.

Dieser Unterschied lässt sich dem ELS-Modell zufolge durch die Entstehungsgeschichte der Galaxis erklären (Kasten Seite 43). Demnach begann das Milchstraßensystem als sphärische Gaswolke, der Protogalaxis, die langsam in Richtung auf ihr Zentrum kollabierte. Das ursprüngliche Gas enthielt kaum schwere Elemente, deshalb sind auch die Sterne, die sich während dieses Kollapses formten, arm an Metallen. Diese ersten Sterne behielten die kinematischen Eigenschaften des Gases der zusammenfallenden Wolke bei. Deswegen umkreisen die Halosterne der Population II und die Kugelsternhaufen noch heute das Zentrum der Galaxis auf exzentrischen Bahnen. Ein Teil der Gravitationsenergie der Wolke wandelte sich bei der Kontraktion in Wärme um. Außerdem nahm die Rotationsgeschwindigkeit der Wolke wegen der Erhaltung des Drehimpulses zu. Diese Umstände ließen die Wolke bevorzugt entlang ihrer Rotationsachse kollabieren. Sie wurde also immer flacher und formte schließlich eine Scheibe. All dies, so beschreiben es ELS, spielte sich in einem Zeitraum von 300 Millionen Jahren ab. Da nach dieser Ära die massereichen Sterne der ersten Generation bereits in Supernova-Explosionen vergangen waren, enthielt das Gas der Scheibe bereits schwere Elemente. Wie die Sterne im Halo, so spiegeln auch die in der Scheibe entstandenen Sterne der Population I die Kinematik und die chemische Zusammensetzung des Gases zur Zeit ihrer Geburt wieder.

Beobachtungen in den nachfolgenden Jahrzehnten zeigten jedoch, dass sich die Galaxis nicht in einem so raschen Kollaps gebildet haben konnte. Das ELS-Modell in seiner ursprünglichen Form war also nicht korrekt. Die Amerikaner Leonard Searle und Robert Zinn schlugen 1978





In einem gewissen Alter der Galaxis wurden keine so genannten Alpha-Elemente (α) wie etwa Sauerstoff erzeugt. Das lässt sich an der Lücke im Verhältnis von Eisen (Fe) zu den Alpha-Elementen erkennen (links). Zu jener Zeit war offenbar das Gas aufgebraucht, aus dem Sterne hätten entstehen können. Erst durch den Zustrom neuen Gases stieg die Sternentstehungsrate wieder an (rechts). (Als Zeitindikator dient hier die relative Häufigkeit der Alpha-Elemente zu Wasserstoff.)

eine Alternative vor. Die beiden Astronomen hatten in Kugelsternhaufen des Halos große Unterschiede in den Häufigkeiten schwerer Elemente beobachtet. Demnach waren manche dieser Kugelsternhaufen erheblich älter als andere – und konnten keineswegs gemeinsam in der kurzen Zeitspanne entstanden sein, die das ELS-Modell dafür vorsah.

Statt des Kollapses einer einzigen Wolke schlugen Searle und Zinn deshalb vor, der Halo habe sich aus der Ansammlung vieler Wolkenfragmente gebildet, in denen bereits zuvor Sterne und Kugelsternhaufen entstanden waren. Wenn solche Fragmente unterschiedliche Entwicklungsgeschichten haben, können sich in ihnen auch Objekte unterschiedlichen Alters befinden. Das Modell von Searle und Zinn wird in gewisser Weise durch den Befund gestützt, dass bis zum heutigen Tag kleine Zwerggalaxien mit dem Milchstraßensystem kollidieren. Diese Zwerggalaxien könnten sich aus übrig gebliebenen Wolkenfragmenten gebildet haben, die in der Frühphase der Galaxis noch nicht zu einem Teil von ihr wurden. Ein Beispiel dafür ist die 1996 entdeckte Sagittarius-Zwerggalaxie. Im Verlauf der Jahrmilliarden pendelt sie immer wieder durch die Ebene des Milchstraßensystems hindurch und verliert jedes Mal einen Teil ihrer Masse. Irgendwann wird sie sich völlig aufgelöst haben (vergleiche „Verborgene Galaxien“, Spektrum der Wissenschaft 1/99, S. 54).

Aussetzer in der Sternentstehung

Andere Forscher haben mehrere so genannte serielle oder parallele Modelle für die Entstehung der Galaxis vorgeschlagen. In einem seriellen Modell bildet sich das Milchstraßensystem kontinuierlich im Verlauf eines einzigen Einfall-Ereignisses. Der Halo repräsentiert dabei die frühesten Stadien dieses Vorgangs, die Scheibe formt sich erst, wenn der Halo bereits fertig ist. Das ELS-Modell ist in diesem Sinne auch seriell, allerdings läuft in ihm alles sehr schnell ab. Im Gegensatz dazu formen sich in den parallelen Modellen alle galaktischen Komponenten mehr oder weniger zur gleichen Zeit aus dem gleichen Gas, entwickeln sich dann aber mit unterschiedlicher Geschwindigkeit gemäß ihrer eigenen Sternentstehungsgeschichte.

Neuere Beobachtungen deuten darauf hin, dass keines der frühen Modelle die Entstehung der Galaxis vollständig zu erklären vermag. In Modellen wie jenem von ELS bildet sich die Scheibe durch einen gleichmäßigen, dissipativen Kollaps des Halos. Dabei wird für die ▶

Das Modell des „doppelten Einfalls“

Diesem Modell zufolge entstanden etwa eine Milliarde Jahre nach dem Urknall aus einer Gaswolke, die kaum schwere Elemente enthielt, zunächst der Halo und der Bulge, der zentrale Wulst der Galaxis. Erst in einer zweiten Phase begann sich durch den Zustrom weiteren Gases mit höherem Drehimpuls die dünne Scheibe zu formen, und zwar von innen nach außen. Der Bereich, in dem sich heute die Sonne befindet, entstand vor etwa zehn Milliarden Jahren. Der Zustrom neuen Gases und damit das Wachstum der dünnen Scheibe dürfte heute noch andauern.

REINHOLD HENKEL / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Literaturhinweise

Wir sind Kinder der Milchstraße. Entstehung und Geschichte unserer Heimatgalaxie. Von K. Croswell. Scherz, 1999.

Die Milchstraße. Von A. Burkert und R. Kippenhahn. C. H. Beck, 1996.

Die Entstehung des Milchstraßensystems. Von S. van den Bergh und J. E. Hesser in: Spektrum der Wissenschaft, Heft 3/1993, S. 34.

The Chemical Evolution of the Galaxy: The Two-Infall Modell. Von C. Chiappini et al. in: The Astrophysical Journal, Bd. 477, S. 765, 1997.

Weblinks zum Thema und Informationen finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

Entstehung der dicken und der dünnen Scheibe ebenfalls ein gleichmäßiger Übergang angenommen – was aber vermutlich nicht der Fall war.

Folgt man den Argumenten von Rosemary Wyse von der Johns-Hopkins-Universität in den USA und Gerard Gilmore vom Institute of Astronomy in Großbritannien, dann sind Halo und dünne Scheibe deutlich unterschiedliche Einheiten, die nicht aus ein und derselben Gaswolke entstanden sein können. Dies schließen die beiden Forscher aus den Drehimpulsen der Sternpopulationen. Wyse und Gilmore konnten zeigen, dass sowohl der Halo als auch die zentrale Verdickung der Scheibe überwiegend aus Sternen mit niedrigem Drehimpuls bestehen, während die dicke und die dünne Scheibe überwiegend Sterne mit großem Drehimpuls enthalten. Weil aber der Drehimpuls eine physikalische Erhaltungsgröße ist, muss diese Eigenschaft der Sterne eine Eigenschaft des ursprünglichen Gases widerspiegeln. Die unterschiedlichen Komponenten der Galaxis müssen also aus unterschiedlichen Gaswolken mit verschiedenen Drehimpulsen entstanden sein.

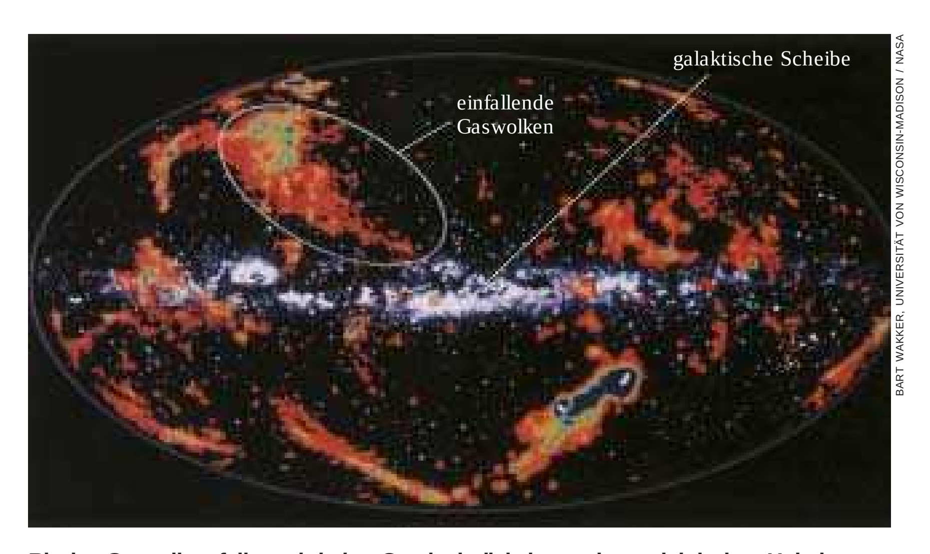
Es gibt außerdem Hinweise darauf, dass die Sternentstehung über die Äonen hinweg nicht stetig verlaufen ist. Beobachtungen von Raffaele Gratton vom Astronomischen Observatorium in Padua (Italien) und seinen Kollegen deuten darauf hin, dass die Sternentstehungsrate in der Sonnenumgebung relativ früh in der Geschichte der Galaxis rapide nachließ. Das Team um Gratton hat die Häufigkeit von Eisen (Fe) relativ zu zwei Alpha-Elementen (α), Sauerstoff und Magnesium, bestimmt, und zwar für Sterne im Halo sowie in der dicken und der dünnen Scheibe. In einer bestimmten Phase der galaktischen Geschichte, deren zeitlicher Verlauf sich im Anstieg von [α/H] widerspiegelt, taucht plötzlich eine Lücke auf, in der praktisch keine Alpha-Elemente produziert worden sind. Im Schaubild zeigt sich diese Lücke als unvermittelter Anstieg von [Fe/α], während [α/H] konstant bleibt (Bild auf Seite 44). Schaut man nach, welche Sterne auf beiden Seiten der Lücke stehen, so lässt sich folgern, dass die Sternentstehung irgendwann nach der Bildung des Halos und der dicken Scheibe, aber vor der Entstehung der dünnen Scheibe aufhörte.

Auch die zeitliche Dauer der Lücke lässt sich ermitteln. Da die Alpha-Elemente von Typ-II-Supernovae freigesetzt werden, also von Explosionen kurzlebiger Sterne, ist deren Produktionsrate ein Maß für die allgemeine Sternentstehungsrate. Da andererseits die Doppelsternsysteme der Typ-Ia-Supernovae bereits lange vor der Lücke entstanden sind, konnte die Häufigkeit von Eisen in dieser Zeitspanne weiter anwachsen. Ausgehend von der typischen Entwicklungszeit der Typ-Ia-Supernovae ergibt sich, dass die Lücke nicht länger als eine Milliarde Jahre gedauert haben kann.

Gratton und seine Kollegen konnten die von ihnen untersuchten Sterne anhand der Geschwindigkeiten in drei verschiedene Populationen unterteilen. Eine Population bildet den Halo, einen Teil der dicken Scheibe und möglicherweise den zentralen Wulst, der aus dem dissipativen Kollaps eines Teils des Halos entstanden ist. Eine weitere Population bildet die dünne Scheibe, die sich aus einem extrem dissipativen Kollaps der Scheibe gebildet hat. Die dritte Population schließlich besteht aus einer relativ kleinen Zahl von Sternen der dicken Scheibe, die einen besonderen Ursprung haben. Diese Population metallarmer Sterne, deren Eisenhäufigkeit weniger als ein Zehntel des solaren Wertes beträgt, ist vermutlich in Satellitengalaxien entstanden und im Zeitintervall der Lücke in das Milchstraßensystem eingedrungen. So gesehen besitzt also die dicke Scheibe zwei unterschiedliche Komponenten.

Auch andere Wissenschaftler haben herausgefunden, dass die dicke und die dünne Scheibe sich kinematisch unterscheiden. Timothy Beers von der Michigan State University in den USA und Jesper Sommer-Larsen von der Universität Kopenhagen haben die Kinematik und die Zusammensetzung einer großen Zahl metallarmer Sterne untersucht. Ihre Analyse scheint zu zeigen, dass die meisten metallarmen Sterne der dicken Scheibe in einem großen Akkretionsereignis, dem plötzlichem Zustrom einer großen Menge an Materie also, entstanden sind.

Wie lässt sich ein derartiges Ereignis erklären? In einem der Szenarien kollidierte eine Begleitgalaxie mit der galaktischen Scheibe zu einer Zeit, als diese hauptsächlich Gas enthielt. Die dünne Scheibe heizte sich durch die Kollision auf, und ein Teil ihrer Materie wurde herausgeschleudert – Baustoff für die metallarmen Sterne der dicken Scheibe. Der Hauptteil der dünnen Scheibe beruhigte sich wieder und bildete in der galaktischen Ebene eine „neue“ dünne Scheibe. Der spätestmögliche Zeitpunkt dieses Ereignisses wird durch die ältesten Sterne der dünnen Scheibe bestimmt, die in der Sonnenumgebung etwa zehn

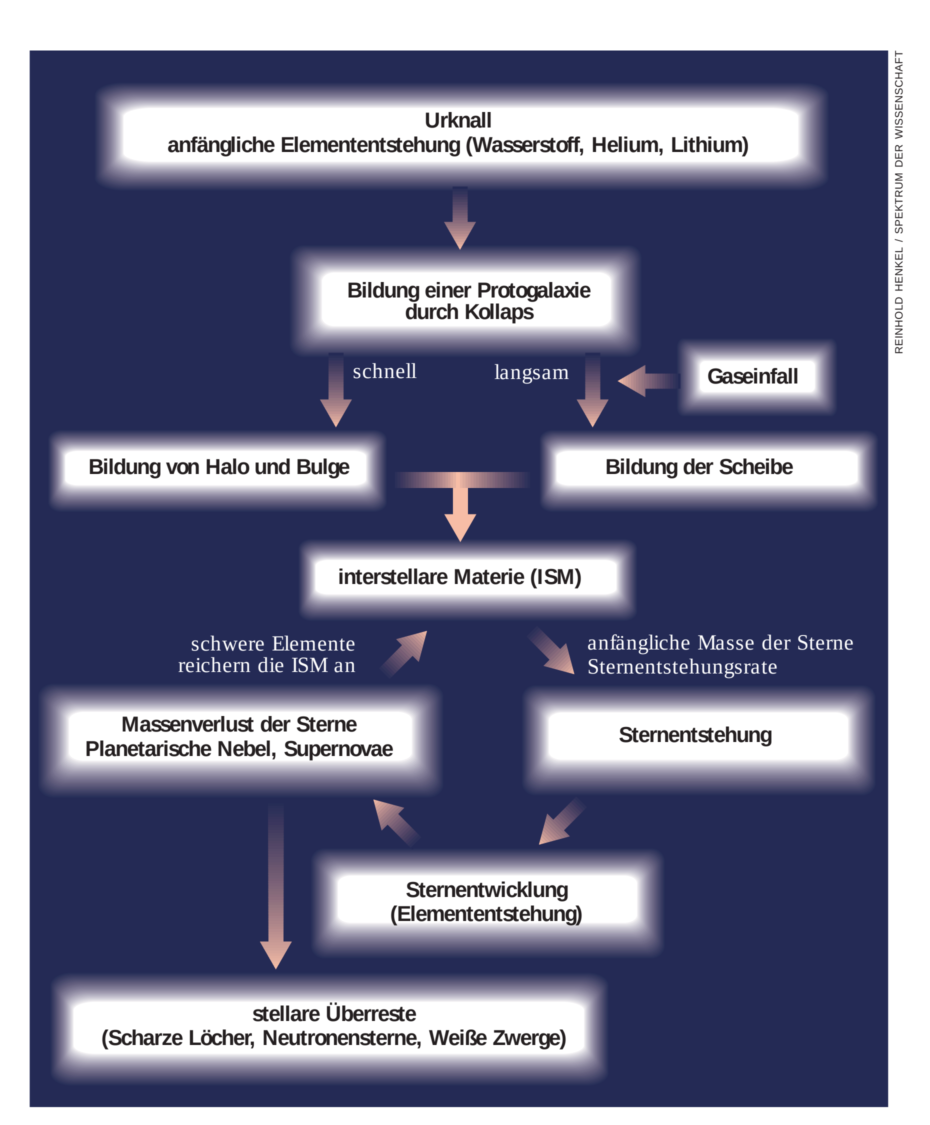


Riesige Gaswolken fallen mit hoher Geschwindigkeit aus dem galaktischen Halo in die Scheibe des Milchstraßensystems ein. Damit sorgen sie für Nachschub an frischem Material, aus dem neue Sterne entstehen können. Im Mittel bildet sich ein neuer Stern pro Jahr.

Milliarden Jahre alt sind. Möglicherweise ist die Lücke in der Sternentstehungsrate, die Grattons Team gefunden hatte, ein Ergebnis dieser Kollision und markiert eine Unstetigkeit in den Bildungsprozessen von Halo und Scheibe.

Zusammenfassend ergibt sich folgendes plausible Bild: Das Material mit geringem Drehimpuls brachte in einem raschen Kollaps den stellaren Halo und zudem durch dissipative Vorgänge den zentralen Wulst der Galaxis hervor. Insofern bleibt das ELS-Modell richtig. Wie Searle und Zinn vorschlugen, trugen später auch Verschmelzungen mit Zwerggalaxien zum stellaren Halo bei. Doch müssten sich diese Vorgänge weitgehend vor Bildung der dünnen Scheibe ereignet haben, die relativ fragil ist. Deshalb können zerstörerische Kollisionen während der letzten fünf Milliarden Jahre nur in geringem Umfang zu ihrer Sternpopulation beigetragen haben. Ganz anders als im ELS-Modell vorgeschlagen entwickelte sich die dünne Scheibe weitgehend unabhängig vom Halo aus Gas mit einem hohen Drehimpuls. Die Dicke der anfänglichen Scheibe erhöhte sich durch die letzte Verschmelzung mit einer Zwerggalaxie vor etwa zehn Milliarden Jahren. Da die Gasmenge der Scheibe dadurch zunahm, bildete sich dort eine zweite Sternpopulation aus, zu der auch unsere Sonne gehört.

Dieses Bild von der Geschichte der Galaxis ist noch heiß umstritten.



Ein Modell, das die chemische Entwicklung unserer Galaxis beschreibt, muss zahlreiche astrophysikalische Vorgänge berücksichtigen.

Das Alter der dünnen Scheibe

Angesichts der jüngsten Beobachtungsbefunde haben meine Kollegen und ich ein neues Modell entwickelt, das die Verteilung der Sterne im Halo und in der Scheibe zu erklären versucht. Dieses Modell eines „doppelten Einfalls" setzt voraus, dass ein anfänglicher Kollaps den Halo – und vermutlich auch einen Teil der dünnen Scheibe – hervorbrachte. Die Sternbildung im Halo dauerte an, bis die Gasdichte unter einen kritischen Wert gesunken war. In unserem Modell geht dem Halo das Gas einerseits auf Grund eines sehr effektiven Sternbildungsprozesses aus; andererseits sammelt sich ein Teil des Gases im Zentrum und lässt den Wulst des Milchstraßensystems entstehen. In einer anschließenden zweiten Phase fällt erneut Gas ein, aus der schließlich die dünne Scheibe hervorgeht. Dieses Ereignis könnte durch die Verschmelzung mit einer kleinen Begleitgalaxie ausgelöst worden sein oder durch Gas mit einem hohen Drehimpuls, das einfach länger braucht, um nach innen zu strömen. Jedenfalls entwickeln sich unseren Überlegungen zufolge Halo und Scheibe weitgehend unabhängig voneinander, wie es bereits Wyse und Gilmore vorgeschlagen hatten.

Aus unserem Modell können wir auch das Alter der dünnen Scheibe abschätzen. Bisher wussten die Astrophysiker nur, dass diese Komponente des Milchstraßensystems länger als eine Milliarde Jahre brauchte, um sich zu bilden. Unbekannt war jedoch, ob die meisten Sterne in der Sonnenumgebung innerhalb von vielleicht zwei oder doch eher acht Milliarden Jahren entstanden. Der zuverlässigste Weg zu einer Altersbestimmung scheint über die in den G-Zwergsternen der Sonnenumgebung beobachtete Häufigkeit schwerer Elemente zu führen.

Denn in jeder neu entstandenen Sterngeneration sind einige G-Sterne dabei. Deren Metallgehalt ist höher als der von älteren G-Sternen, weil das interstellare Medium zwischenzeitlich stärker mit schweren Elementen angereichert wurde. Weil aber diese Zwergsterne so langlebig sind, sollten alle jemals gebildeten noch zu beobachten sein. Wenn wir also Randbedingungen wie die Sternentstehungsraten und die allmähliche Anreicherung des interstellaren Gases in unseren Entwicklungsmodellen korrekt berücksichtigen, sollten wir aus den beobachteten Elementhäufigkeiten in den G-Sternen auf die Entstehungsgeschichte der dünnen Scheibe in der Sonnenumgebung schließen können.

Die bis 1995 durchgeführten Modellrechnungen stützten sich auf G-Stern-Beobachtungen, die überwiegend von 1975 stammen. Demnach sollte sich die dünne Scheibe innerhalb von drei Milliarden Jahren gebildet haben. Da dies nicht wesentlich länger ist als die eine Milliarde Jahre für die Entstehung des Halos, machten die alten Modelle die plausible Annahme, dass sich die dünne Scheibe aus dem Halogas gebildet habe. Störend an diesem einfachen Einfall-

Modell war allerdings, dass aus dieser Annahme für das Massenverhältnis von Halo zu Scheibe ein Wert von etwa 1:5 folgt, während der empirische Wert bei ungefähr 1:20 liegt.

Basierend auf neuen, präziseren Messungen überarbeiteten nach 1995 zwei Forschergruppen unabhängig voneinander das Datenmaterial über die Elementhäufigkeiten in G-Sternen. Nun ergaben sich weitere Widersprüche zum einfachen Einfall-Modell, die sich nur durch die Annahme einer längeren Bildungsdauer der dünnen Scheibe überwinden ließen.

Unser doppeltes Einfall-Modell, das einen späteren zweiten Gaszustrom voraussetzt, ist mit dieser Annahme verträglich. Mit dem neuen Datenmaterial über die G-Sterne finden wir, dass es etwa sieben Milliarden Jahre dauerte, bis sich die dünne Scheibe in der Sonnenumgebung herausgebildet hatte. Dies bedeutet wiederum, dass das Material für die dünne Scheibe nicht aus dem Halo stammt, sondern aus Bereichen außerhalb der Galaxis zugeführt wurde.

Die Entwicklungswege von Halo und Scheibe verliefen demnach weitgehend unabhängig voneinander. Einige Beobachtungen weisen auf verschiedene Bildungsetappen der dünnen Scheibe hin. So legen Messungen der Elementhäufigkeiten in verschiedenen Regionen der Scheibe eine Abnahme des Metallgehalts in Richtung auf das galaktische Zentrum nahe. Dort befinden sich also die ältesten Sterne, und die Sternbildung der Scheibe scheint sich von innen nach außen fortgepflanzt zu haben.

Wächst die Scheibe noch immer?

Meine Kollegen und ich sind dieser Vermutung nachgegangen. Dabei zeigte sich, dass die Sternbildung im inneren Bereich der Scheibe nahezu unabhängig vom Halo verlief, während außen eine Vermischung von Scheiben- und Halogas vor Bildung der Sterne eine Rolle spielte. Wir vermuten, dass diese Vermischung in den Außenregionen der Scheibe sogar heute noch stattfindet.

Sollte die Scheibenbildung weiter außen tatsächlich noch andauern, müsste sich dies eigentlich direkt beobachten lassen. Leo Blitz von der Universität von Kalifornien in Berkeley vermutet, dass die bereits seit über vierzig Jahren bekannten, vergleichsweise kompakten Hochgeschwindigkeitswolken Indizien für diesen Vorgang sind. Demnach müsste das Gas auf die Scheibe zufallen und sich irgendwann mit ihr vermischen. Andere Forscher vermuten allerdings, die Wolken bestünden aus Material, das ursprünglich von Supernovae aus der



Scheibe herausgeschleudert wurde, so wie es bei den so genannten galaktischen Fontänen zu beobachten ist (vergleiche „Das Gas zwischen den Sternen“, Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 30).

Um zwischen den beiden Vermutungen unterscheiden zu können, müssen wir die Elementhäufigkeiten in den Hochgeschwindigkeitswolken messen: Sollte es sich um frisches einfallendes Gas handeln, das noch nicht von Sternbildung beeinflusst ist, dürften kaum schwere Elemente nachzuweisen sein. Sind die Wolken hingegen zurückfallende Fontänen, so müssten sie reich an schweren Elementen sein.

Unabhängig von ihrem Ursprung vermehren die Wolken auf jeden Fall die Masse der Scheibe. Ihr Material reicht aus, um durchschnittlich jedes Jahr einen neuen Stern in der Scheibe aufleuchten zu lassen, was im Einklang mit der in der Sonnenumgebung beobachteten Sternentstehungsrate steht.

Um die galaktischen Evolutionsmodelle weiter verfeinern zu können, brauchen wir weiteres Beobachtungsmaterial. So können wir über die Bildungsdauer der dünnen Scheibe außerhalb der direkten Sonnenumgebung nichts aussagen, weil uns von dort keine Daten vorliegen. Wir kämen erheblich weiter, wenn wir zum Beispiel die Verteilung von Deuterium in der Galaxis kennen würden. Dieses schwere Wasserstoff-Isotop ist nämlich ein empfindlicher Indikator für den Gasverbrauch einer betrachteten Region. Denn das gesamte heute vorhandene Deuterium stammt noch aus dem Urknall, da es keinen stellaren Prozess gibt, der es erzeugen würde – nur solche, die es verbrauchen. Der Deuteriumgehalt des interstellaren Gases sinkt also mit fortschreitender Sternbildung. Eine Kartierung des Deuteriumgehalts für die gesamte Galaxis würde so zum Beispiel Unterschiede zwischen innerer und äußerer Scheibe aufdecken können.

Bisher gibt es nur eine einzige Deuterium-Messung für eine Region außerhalb der Sonnenumgebung. Donald Lubowich vom Amerikanischen Institut für Astrophysik in New York und seine Kollegen fanden im galaktischen Zentrum den niedrigsten Deuteriumgehalt, der jemals beobachtet wurde – nur ein Neuntel des Wertes in der Sonnenumgebung. Dieser Befund deckt sich mit der Hypothese, dass die Sternbildung von innen nach außen verlief. Doch vom Außenbereich der Galaxis liegen uns noch keine Messungen vor. Das wird sich freilich in Bälde ändern, denn der Satellit Fuse (*Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer*), der sich bereits in einer Erdumlaufbahn befindet, soll die Deuteriumhäufigkeit in der gesamten Galaxis kartieren.

In fernerer Zukunft wird der europäische Satellit Gaia, der 2012 starten soll, äußerst wertvolle Daten liefern. Gaia wird von mehr als einer Milliarde Sterne mit bisher unerreichter Genauigkeit die Positionen, Geschwindigkeiten und Elementhäufigkeiten messen. Vorerst müssen wir uns mit unserem unvollständigen Kenntnisstand begnügen. Der Astrophysiker Alan Sandage hat dies kürzlich so ausgedrückt: „Die Untersuchung unserer kosmischen Ursprünge ist die Kunst, aus unbefriedigenden Indizien befriedigende Schlussfolgerungen zu ziehen.“ ■

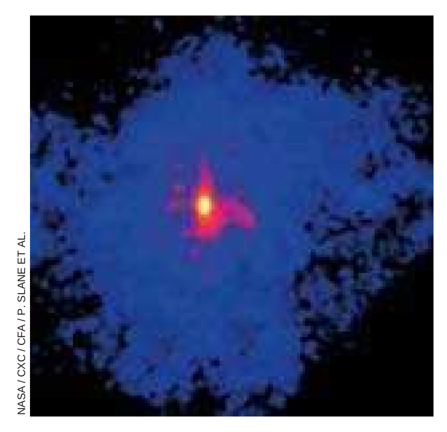


Cristina Chiappini *ist Astronomin an der Sternwarte Triest (Italien). Sie arbeitet an Modellen zur Bildung des Milchstraßensystems und beobachtet Planetarische Nebel, um deren Beitrag zur chemischen Entwicklung der Galaxis herauszufinden.*

ASTRONOMIE

Seltsame Sterne

Im Weltall hat so manches Bestand, was auf der Erde allenfalls unter extremen Versuchsbedingungen herstellbar ist. Man denke nur an Schwarze Löcher und Neutronensterne. Nun gibt es anscheinend einen Neuzugang in diesem Kuriositätenkabinett: Sterne aus seltsamer Materie. Sie sind gleich doppelt ungewöhnlich. Zum einen bestehen sie aus puren Quarks – Elementarteilchen, die auf der Erde nie einzeln, sondern normalerweise nur in Dreiergruppen in Atomkernen auftreten. Und zum anderen sind diese Quarks von einer besonderen Art (Flavor), wie sie gleichfalls in irdischer Materie nicht vorkommt. Theoretiker hielten die Existenz solcher seltsamen Materie schon länger für möglich. Jetzt haben Astronomen am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics zwei Sterne aufgespürt, die aus ihr bestehen könnten. Beide wurden bisher für Neutronensterne gehalten. Doch wie sich nun herausstellte, ist der eine – RXJ1856 – dafür zu kompakt und der andere – 3C58 – zu kalt. Die Dichte dieser seltsamen Sterne liegt zwischen der von Neutronensternen und Schwarzen Löchern. Sie könnten beim finalen Kollaps von Himmelskörpern einer ganz bestimmten Masse entstehen. *(The Astrophysical Journal, 20. 6. 2002)*



NASA / CXC / CFA / P. SLANE ET AL.

Reiner Quark? Der Stern 3C58 – hier im Röntgenlicht – ist für normale Materie zu kalt.

KREBSTHERAPIE

Hirntumoren ausschallen

Wirklich sicher lassen sich Gehirntumoren nur chirurgisch nach Öffnung des Schädels entfernen – eine schwierige Operation mit dem Risiko dauerhafter Behinderungen. Nun bietet sich eine aussichtsreiche Alternative: Gebündelter Ultraschall könnte die Geschwulst im Kopf durch Überwärmung zerstören. Bisher vereitelte der Schädelknochen diese Möglichkeit, da er die akustischen Wellen sehr unregelmäßig streut und sich selbst erhitzt. Gegen Überhitzung hilft eine Art Helm mit vielen separaten Ultraschallquellen, der die Energie über die Schädeloberfläche verteilt und so eine lokale Konzentration von Wärme im Knochen vermeidet. Zudem haben Greg Clement und Kullervo Hynynen von der Harvard Medical School in Boston nun einen Algorithmus entwickelt, der auch berechnet, wie die lokale Dicke, Dichte und Orientierung des Schädelknochens den Weg der Ultraschallwellen beeinflussen. Er kann die Intensität der einzelnen Schallquellen im Helm so steuern, dass die Wellen millimetergenau am gewünschten Ort fokussiert werden. Die Forscher testeten ihre Methode erfolgreich an wassergefüllten Totenschädeln, in denen sie mit Hydrofonen die Verteilung der Schallenergie maßen. *(Physics in Medicine and Biology, Bd. 47, S. 1219)*

MUTATIONSRATEN

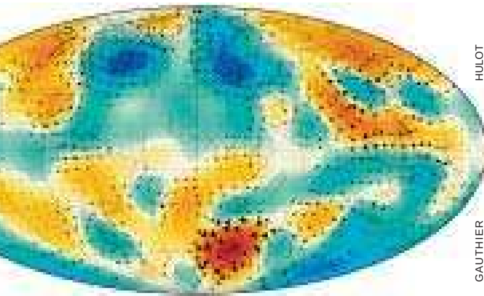
Evolution ist männlich

Männer sind für die Evolution wichtiger als Frauen – weil sie mehr Fehler machen. Ungenauigkeiten bei der Vervielfältigung ihres Erbguts haben für die Entwicklung der Art sogar größere Bedeutung als Mutationen durch Umweltfaktoren. Dies fanden Kateryna Markova und Wen-Hsiung Li von der Universität von Chicago bei jüngsten Untersuchungen heraus. Damit bestätigten sie eine fast fünfzig Jahre alte Hypothese, wonach vor allem in der männlichen Keimbahn Fehler auftreten, welche die Evolution vorantreiben. Der Grund ist, dass Männchen viel mehr Spermien produzieren als Weibchen Eizellen. Dadurch wird das Erbgut in ihrer Keimbahn weitaus öfter verdoppelt – und dabei möglicherweise verändert – als in der weiblichen. Markova und Li verglichen bei einer Reihe von Tierarten einen (bedeutungslosen) Genabschnitt, der sowohl auf dem rein männlichen Y-Chromosom als auch auf dem von beiden Geschlechtern geteilten Chromosom 3 vorkommt. Dabei fanden sie eine deutlich unterschiedliche Mutationsrate: Sie war auf dem Y-Chromosom durchweg höher als auf dem mit der Nummer 3. Dieser Unterschied nahm mit der Entfernung der Arten im Stammbaum zu – auf mehr als das Fünffache. Genau das ist zu erwarten, wenn die männliche Mutationsrate die Evolution bestimmt. *(Nature, Bd. 416, S. 624)*

GEOPHYSIK

Steht das Erdmagnetfeld vor der Umkehr?

Vielleicht wird der Polarstern schon in wenigen Jahrtausenden zum einzig zuverlässigen Richtungsweiser, da auf den Kompass dann kein Verlass mehr ist. Denn das Magnetfeld der Erde scheint auf dem besten Weg, seine Polarität umzukehren. Dabei würde es sich zunächst auflösen und dann in entgegengesetzter Orientierung neu erstehen. Solche Umpolungen gab es in der Erdgeschichte immer wieder. Da die letzte vor 750 000 Jahren stattfand, ist eine weitere längst überfällig. Ursache des Erdmagnetfeldes sind Ströme flüssigen Eisens in der äußeren Erdkruste. Computermodellen zufolge sollte sich eine Umkehr durch Wirbel in dieser Strömung ankündigen, die das bestehende Feld schwächen. Jetzt konnten Gauthier Hulot und seine Kollegen am Institut de Physique du Globe in Paris aus Satellitendaten der letzten zwanzig Jahre solche Wirbel ableiten. Sie fanden sich unter der Südspitze Afrikas und in Zonen nahe der Pole, wo sich das Magnetfeld bereits umgedreht hat. Ob es sich wirklich komplett umpolt, ist trotzdem offen; denn schon öfter hat es zu einer Umkehr angesetzt, den Vorgang dann aber abgebrochen und die alte Orientierung wieder angenommen. (*Nature, Bd. 416, S. 620*)



HULOT

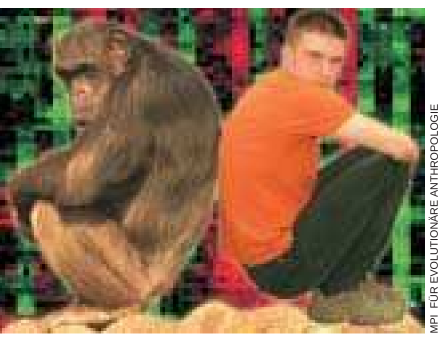
GAUTHIER

Magnetfeldwirbel am Südpol könnten Vorboten einer Umpolung des Geodynamos sein.

MENSCHWERDUNG

Was uns wirklich vom Affen unterscheidet

Unser Genom ist zu 99 Prozent identisch mit dem von Schimpansen. Warum heben wir uns dann – vor allem intellektuell – so deutlich von ihnen ab? Offenbar weil wir einen sehr viel anderen Gebrauch von unseren Genen machen. Das hat nun ein Team um Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig herausgefunden. Es untersuchte, welche Gene im Gehirn und in der Leber von Affen und Menschen tatsächlich genutzt werden. Als Maß dafür diente die Art und Menge an Boten-RNA-Molekülen; sie liefern als „Blaupausen" der aktiven Gene den Bauplan der darin verschlüsselten Eiweißstoffe an die Proteinfabriken. Die in einer Zelle vorhandene Boten-RNA wurde mit einem Fluoreszenz-Farbstoff markiert und dann auf Gen-Chips aufgetragen, die bis zu 18 000 bekannte Gene auf ihrer Oberfläche trugen. Jede Boten-RNA band sich spezifisch an ihr Gegenstück, sodass sich aus Position und Stärke des Fluoreszenz-Signals auf dem Chip das Muster der Genaktivität ablesen ließ. Ergebnis: Der Mensch benutzt vor allem im Gehirn andere Gene als der Affe. Inwieweit dies auch funktionelle Unterschiede widerspiegelt, ist allerdings unklar, da die Funktion der meisten Gene noch nicht bekannt ist. (*Science, Bd. 296, S. 340*)



MPI FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

Genetisch kaum unterscheidbar: Mensch und Schimpanse

ELEKTRONIK

Wählerische Moleküle

Die elementarsten Elektronik-Bausteine – so genannte Dioden – lassen den Strom nur in einer Richtung passieren. Realisiert werden sie heutzutage durch ein Sandwich aus zwei unterschiedlich dotierten Halbleitern. Im Computer der Zukunft sollten allerdings noch sehr viel kleinere Komponenten diese Aufgabe übernehmen. Wie Heiko Weber und seine Kollegen vom Forschungszentrum Karlsruhe nun nachwiesen, eignen sich dafür im Prinzip die kleinsten denkbaren Bausteine überhaupt: einzelne Moleküle. Die beiden Forscher schafften es mit einem hochkomplizierten Verfahren, jeweils genau ein symmetrisches oder asymmetrisches organisches Molekül zwischen zwei winzige Goldelektroden zu klemmen. An diese Brücke legten sie dann eine Spannung unterschiedlicher Polarität an und maßen den Stromfluss. Wie erwartet, kümmerte es das symmetrische Molekül nicht, welche Elektrode negativ und welche positiv geladen war: Es leitete den Strom in beide Richtungen mehr oder weniger gleich gut. Nicht so beim asymmetrischen Pendant: Hier hing die Stromstärke deutlich vom Vorzeichen der Spannung ab. Zwar wurde der Elektronenfluss nicht in einer Richtung völlig unterbunden. Aber dies ist vielleicht nur eine Frage des optimalen Moleküls. *(Physical Review Letters, Bd. 88, S. 176804)*



FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Organische Moleküle zwischen den Goldspitzen leiten richtungsabhängig Strom.

VERHALTEN

Urin als Waffe

Flusskrebse leben dicht gedrängt in Gruppen von bis zu zwanzig Tieren pro Quadratmeter. Streitereien sind darum an der Tagesordnung. Männliche Tiere setzen bei diesen Kabbeleien eine ganz besondere Waffe ein: ihren Urin. Dies zeigten Thomas Breithaupt von der University of Hull und Petra Eger von der Universität Konstanz, indem sie den Harn der Krebse mit dem Farbstoff Fluorescein einfärbten. Die fluoreszierende Wolke, die die Männchen auf ihre Gegner abschossen, fiel bei aggressiven und siegessicheren Tieren größer aus als bei schwächeren. Zudem enthält der Urin chemische Signale, die über den Ernährungs- und Gesundheitszustand und damit auch die Stärke des Streithahns informieren. So erkennt der Gegner schnell, ob er überhaupt eine Chance hat. Längere Kämpfe werden dadurch vermieden. Die Krebse entleeren ihre Blase vorwiegend bei Auseinandersetzungen – schließlich wollen sie nicht ohne Not die ganze Kolonie über ihre momentane Verfassung ins Bild setzen. *(Journal of Experimental Biology, Bd. 205, S. 1221)*



THOMAS BREITHAUPT

Ein Schwall Urin (grün) zeigt, wer das Sagen hat.

Prinzesschens Reisen nach Afrika

Dank kleiner Sender auf dem Rücken von Störchen beobachten Ornithologen die Vögel auf ihren Afrikareisen nun kontinuierlich über Satelliten. Zu den Routen und Flugleistungen vieler Vogelarten liefert die neue Technik grundlegende Erkenntnisse, die nun auch in internationalen Schutzprogrammen umgesetzt werden.



ALLE KARTEN: NACH VORLAGEN DER VOGELWARTE RADOLFZELL THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Von Peter Berthold und Ulrich Querner

Prinzesschen kommt weit herum. Den Sommer verbringt die Störchin stets an ihrem Geburtsort Loburg in Sachsen-Anhalt. Doch im Winter besucht sie im einen Jahr Kenia, in einem anderen zieht sie weiter bis nach Tansania, oder sie fliegt sogar nach Südafrika. Dass Störche nicht jedes Jahr dasselbe Winterquartier wählen, sondern gern weit auseinander liegende Gebiete anfliegen, wissen wir erst, seit wir Einzelne von ihnen mit Sendern ausgestattet haben, deren Signale Satelliten auffangen und zur Erde zurücksenden.

Diese und viele andere unerwartete Erkenntnisse über den Vogelzug hat die Satelliten-Telemetrie bereits innerhalb weniger Jahre erbracht. Ornithologen beobachten auf diese Weise weltweit inzwischen schon über fünfzig Vogelarten, darunter Adler, Geier, Kraniche, Albatrosse, Sturmtaucher, Schwäne, Gänse, Enten, Pelikane und Pinguine.

Das Storchenprojekt der Vogelwarte Radolfzell der Max-Planck-Forschungsstelle für Ornithologie geht ursprünglich auf eine Initiative des damaligen Bundeslandwirtschaftsministeriums Mitte der achtziger Jahre zurück. Das Ziel war, im Rahmen der 1979 getroffenen internationalen „Bonner Konvention zum Schutz wandernder wild lebender Tiere (CMS)“ ein die Kontinente überspannendes Schutzkonzept für Zugvögel und insbesondere auch für den östlichen Weißstorch zu erarbeiten, dessen Bestände bisher noch wesentlich größer sind als die westlichen.

Damals nahmen in der Ornithologie Ideen Gestalt an, Vögel mit kleinen Sendern auszustatten, deren Signale Satelliten erfassen und zur Erde schicken. So wollte man die Wege der Vögel verfolgen. Für den Weißstorch möchten wir mit Hilfe dieser Technik unter anderem herausfinden, wieweit die bisherigen Vorstellungen über seine Zugrouten, sein Zugverhalten und seine Winterquartiere stimmen, welche ökologischen Ansprüche er hat und welche Bedingungen er unterwegs und in den Überwinterungsgebieten antrifft.

Viele dieser Fragen sind gleichzeitig von hohem wissenschaftlichem Interesse. Denn trotz langer intensiver Forschungen weltweit wissen wir über manche wichtigen Phänomene des Vogelzugs immer noch äußerst wenig. Zu den größten Rätseln gehört beispielsweise immer noch, wie die Vögel überhaupt an ihren Heimatort zurückfinden. Die neuen Beobachtungen an den Störchen sowie an manchen anderen Arten liefern hierzu nun bereits neue Erkenntnisse.

Schon immer haben sich die Menschen gewundert, wo die Vögel im Winter bleiben. Der griechische Philosoph Aristoteles (384–322) vermutete, dass die Schwalben – wie die Frösche – in der



Satelliten helfen in der Vogelzugforschung. Sie orten Signale von Sendern auf dem Rücken der Vögel. Rund hundert Weißstörche haben Ornithologen auf ihrem Zug nach Afrika und zurück verfolgt. Dabei entdeckten sie neue Überwinterungsgebiete und Zugstrategien.

kalten Jahreszeit in Sümpfen versinken. Dies glaubte noch der schwedische Naturforscher Carl von Linné (1707–1778). Doch zu seiner Zeit verdichteten sich auch schon Zweifel an dieser Theorie, die Afrikareisende nährten. Es gab zum Beispiel Berichte, dass Weißstörche und Rauchschwalben in unseren Wintermonaten in West- oder Südafrika zu sehen seien, aber nicht in unseren Sommermonaten. Wie aber konnte man nachweisen, ob Vögel wirklich so weite Reisen unternahmen?

Gewissheit brachte hierüber erst die Vogelberingung, die ein dänischer Lehrer Ende des 19. Jahrhunderts erfand. Ringe von in Europa gefangenen oder als Nestlinge markierten Vögeln wurden bald aus afrikanischen Ländern zurückgeschickt. Daraus konnten Ornithologen mit der Zeit Zugrouten und Aufenthaltsorte erschließen. Doch insgesamt blieb diese Methode recht ungenau. Es hängt vom Zufall ab, ob jemand einen der beringten Vögel findet oder erjagt und den Ring dann an die daran angegebene Adresse schickt. Auch lassen sich so nur die Zugkorridore der Gesamtpopulation erfassen, nicht die individuellen Zugwege. Und niemals ist sicher, ob ein registrierter Vogel den normalen Weg geflogen oder am Fundort nur gestrandet ist.

Neue Ära der Vogelforschung

Die Satelliten-Telemetrie eröffnet nun völlig neue Möglichkeiten. In günstigen Fällen, wenn die Sender lange genug halten, lassen sich mit Hilfe dieser Technik einzelne Vögel schon jahrelang verfolgen und auf dem zigtausende Kilometer weiten Zug täglich mehrmals orten. Wir haben schon über hundert Weißstörche mit Sendern versehen und von vielen zumindest einen Teil ihrer Zugstrecke hin und zurück verfolgen können. Etliche vermochten wir sogar lückenlos vom Wegzug bis zu ihrer Rückkehr ins Brutgebiet im folgenden Jahr zu telemetrieren. In einigen Fällen gelang dies über einen Zeitraum von bis zu fünf Jahren.

1991 erhielten die ersten sechs Jungstörche aus Brandenburg und Sachsen-Anhalt einen Sender. Im Herbst 1993 folgten wir dem ersten Vogel via Satellit bis nach Südafrika und auf seinem Rückzug noch bis nach Sambia – über eine Gesamtdistanz von 13000 Kilometern. Von der Störchin Prinzesschen lieferte ein Sender in der Wintersaison 1994/95 während des gesamten Hin- und Rückzugs (des „Wegzugs“ und „Heimzugs“) Signale: auf einer Strecke von über 16000 Kilometern bis zur Serengeti in Tansania und zurück. Diese Störchin, die wir nun bereits mehrere Winter hindurch beobachtet haben, wurde in diesem Frühjahr zusammen mit fünf mit Sendern versehenen Artgenossen zum Fernsehstar. Die Morgenmagazine von ARD und ZDF und das Internet brachten zwei Wochen lang täglich die neuesten Nachrichten von ihrem Flug.



WEGNER / PREMIUM

THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Zwergschwäne gehörten zu den Pionieren der Satelliten-Telemetrie. Die Ersten dieser Vögel wurden in Holland, wo sie den Winter verbrachten, mit Sendern ausgestattet. Auf ihrem Heimzug in die sibirischen Brutgebiete überqueren sie die offene Ostsee, wie die Ortungen erwiesen.

Anfänglich sollten diese Studien ein Projekt der D-2-Raumfahrtmission werden, was sich wegen der „Challenger"-Katastrophe 1986 jedoch zerschlug. Schließlich konnte sie mit dem kommerziellen, satellitengestützten Ortungs- und Sammelsystem Argos (*Advanced Research and Global Observation Satellite*) verwirklicht werden, das CNS (*Centre National D'Etudes Spatial*) in Frankreich, Nasa und NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) in den USA gemeinsam betreiben. Die Finanzierung trug hauptsächlich das Bundesumweltministerium. Die Leitung hatte die Vogelwarte Radolfzell in Verbindung mit der Bundesforschungsanstalt für Naturschutz. Zunächst diente das Argos-System in den siebziger Jahren der Erforschung mariner und atmosphärischer Daten. Heute steht es einer Vielzahl von Nutzern zur Verfügung und wird auch in vielen Umweltschutzprojekten eingesetzt. Die Zentralstation in Europa, von der wir unsere Daten beziehen, liegt in Toulouse.

Vor zwanzig Jahren versahen Biologen erstmals große wandernde Tiere mit Satellitensendern. Die ersten Vögel konnten sie Mitte der achtziger Jahre telemetrieren, nachdem leichtere Sender verfügbar wurden. Zunächst waren dies große Vögel wie Adler und Albatrosse, die ein Gewicht von mindestens 200 Gramm ohne Beeinträchtigung zu tragen vermochten. Wir selbst erprobten die Technik zuerst 1990 an Zwergschwänen, die mit Sendern von Holland in ihre nordsibirischen Brutgebiete zogen, und später an einem Gänsegeier in Spanien.

Die Studien mit Störchen wurden möglich, als Sender auf den Markt kamen, die mit allem Zubehör deutlich unter 100 Gramm wogen. Die Apparatur, die wir heute verwenden, wiegt nur noch 35 Gramm, rund ein Prozent des Gewichts eines ausgewachsenen Storchs. Wir wissen, dass diese Sender die Vögel überhaupt nicht beeinträchtigen. Der Sender verschwindet mitsamt dem Rucksack fast völlig im Rückengefieder. Nur die Solarzelle und die Antenne sind zu sehen (Bild Seite 57 Mitte). Von Solarzellen versorgte Sender sind nicht nur leichter als früher die batteriegetriebenen, sondern bleiben auch um vieles länger in Funktion. Die Antenne steht am Rücken vor – der Storch putzt sie wie einen Federkiel mit.

Oststörche und Weststörche

Bereits die Beringung half viele Aspekte des Storchenzuges klären. In gut hundert Jahren erhielten über 300 000 Weißstörche individuell gekennzeichnete Ringe, von denen mehr als 35 000 zurückgesandt wurden. Die Fundorte ließen erkennen, dass der Weißstorch auf zwei Routen nach Afrika zieht. Die Westroute führt über Gibraltar nach Westafrika, in die Sahelzone und bis nach Nigeria, die Ostroute in einem schmalen Korridor über den Bosporus, Israel und Sinai in die Savannen südlich der Sahara und bis nach Südafrika. Die so genannte Zugscheide in Europa zwischen „Weststörchen" und „Oststörchen" verläuft von Norddeutschland nach Bayern.

Wie die Telemetrie-Studien zeigen, halten sich die West- und Oststörche in Afrika nicht völlig getrennt. Ein Storch aus Sachsen-Anhalt flog auf der Ostroute in den Sudan und dann nach Westen bis nach Nigeria. Doch noch wichtiger für den Storchenschutz ist, dass wir auf ein bisher unbekanntes großes Aufenthaltsgebiet der Oststörche stießen. Für das erste größere Etappenziel, an dem die Störche wochenlang verweilen, hielten die Ornithologen bisher den Osten des Sudan. Genauso wichtig ist für die Vögel aber eine große Region im westlichen Sudan und im Tschad. Aus diesem Gebiet hatte die Bevölkerung nie Ringe zurückgesandt.

Über die Rast während des Zuges wussten wir bisher auch nicht viel. Unsere Mitarbeiter (darunter Michael Kaatz und Karl-Heinz Dubian) sind telemetrierten Störchen auf ihrer Reise durch Europa und bis nach Syrien mit Auto oder Flugzeug gefolgt und haben sie auf den Rastplätzen beobachtet. Bisher haben sie – in Polen, Tschechien, der Slowakei, Ungarn, Rumänien, Bulgarien, ▶

Stichwort

Vogelzug
Schätzungsweise 50 Milliarden Vögel weltweit sind **Zugvögel**. Im Gegensatz zu den **Standvögeln** suchen sie für die ungünstige Jahreszeit ein entferntes Ausweichgebiet (ein so genanntes **Winterquartier**) auf. Beim **Wegzug** (dem Flug ins Winterquartier) lassen sie sich vor allem von einem inneren Programm leiten, dass den Zugweg vorgibt. Der **Heimzug** (Rückflug ins Brutgebiet) erfolgt nach den neuen Ergebnissen vermutlich weitgehend durch Navigation, also nicht durch einfache Umkehr des Wegzugs.

Storchenzug
Der Weißstorch fliegt ab Mitte August Richtung Süden. **Oststörche** (Ostzieher) umgehen das Mittelmeer auf der Ostroute via Bosporus, Golf von Iskenderun und Sinai. Sie überwintern im Sudan bis zum Tschad, oder weiter südlich in Kenia, Tansania oder Südafrika. **Weststörche** nehmen die Westroute über Gibraltar und ziehen nach Westafrika bis Nigeria. Die **Zugscheide** verläuft in Deutschland von Norddeutschland nach Ost-Bayern. Ab Ende Februar kehren die ersten Störche in die Heimat zurück. Sie brüten ab Anfang April.



Wanderalbatrosse (oben) offenbarten erst dank der Satelliten-Telemetrie ihre erstaunlichen Flugleistungen. Zu den vielen Greifvögeln, deren Verhalten Ornithologen nun unter neuen Gesichtspunkten erforschen, gehört der Wanderfalke (links). Für den Schutz des Präriebussards (unten) machte sich die Technik bereits bezahlt. Plüschkopfenten (rechts), die in Ostsibirien und Nordalaska brüten, gehören zu den am häufigsten telemetrierten Vogelarten.

Das Argos-System

Daueröberwachung aus dem Weltall

Für das Argos-System (der Name steht für *Advanced Research and Global Observation Satellite*) sind zurzeit fünf Satelliten ausgerüstet, die in etwa 850 Kilometer Höhe, also auf relativ niedrigen Umlaufbahnen, über die Pole um die Erde kreisen. Aus dieser Höhe erfassen die Empfänger die Funksignale der auf sie abgestimmten Sender von einem 5000 Kilometer weiten Bereich auf der Erde. Wegen der polaren Umlaufbahn werden Sender in höheren Breiten häufiger erfasst als in Äquatornähe. Doch auch dort passiert ein Satellit einen Sender noch etwa sechsmal täglich.

Der Satellit befindet sich etwa zehn bis fünfzehn Minuten im Empfangsbereich des Senders – lange genug für dessen Ortung. Die Sendeimpulse, die alle 60 Sekunden mit einer Frequenz von 401,65 Megahertz ausgestrahlt werden, lassen sich über den Doppler-Effekt lokalisieren. Einfach gesagt werden die Frequenzverschiebungen berechnet, die sich dadurch ergeben, dass Sender und Empfänger sich relativ zueinander bewegen. Solange sich der Satellit dem Sender nähert, steigt die Frequenz kontinuierlich, wenn er sich entfernt, nimmt sie ab.

Das Signal des Senders enthält Informationen über die Sendernummer, die Batteriespannung sowie über die Umgebungstemperatur und die Bewegungsaktivität des Vogels. Der Satellit übermittelt diese Daten zur Erde, wenn er die nächste hierfür eingerichtete Bodenstation überfliegt. Von dort werden die Daten in unserem Falle zum europäischen Argos-Betriebszentrum in Toulouse weitergeleitet, wo die Position des Senders berechnet wird.

Diese Position erhalten wir dann sogleich über unsere Netzverbindung. Mit nur geringer Zeitverzögerung von zwei bis acht Stunden erfahren wir den aktuellen Aufenthalt des Vogels, unter optimalen Bedingungen bis auf 150 Meter genau.

KOLBAN / IFA-BILDERTEAM

der Türkei und Syrien – über 200 Rastplätze registriert und deren Qualität und Zustand nach dem Storchenbesuch erfasst. In Israel, durch das sämtliche Oststörche in einem schmalen Korridor ziehen, warten unsere Kollegen (unter anderem Willem van der Bossche und Yossi Leshem) in der Zugzeit an den Rastplätzen auf die Sender tragenden Störche. An den Sendeantennen sind diese Vögel im Schwarm am Boden mit dem Fernglas zu erkennen. Wo sie sich gerade befinden, melden zunächst grob die Satellitendaten und genauer dann eigene Peilungen der Signale aus der Nähe.

Wie wir feststellten, ziehen Störche sehr zügig. Für die 5500 bis 6000 Kilometer von Ostdeutschland bis in den Sudan brauchen sie normalerweise nur rund drei Wochen. Sie fliegen am Tag sieben bis zehn Stunden und legen bei einer durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit von 35 Stundenkilometern täglich 250 bis 300 Kilometer zurück. Ähnlich verläuft der Rückzug zum Brutgebiet.

Eine unbekannte Zugstrategie

Da Störche die großen Flugstrecken weitgehend segelnd überwinden, sind sie auf Aufwinde angewiesen, von denen sich der ganze Schwarm am Vormittag, sobald genügend Thermik aufkommt, zunächst in Höhen bis zu 4000 Meter tragen lässt. Dann segelt er in Zugrichtung bis zum nächsten Aufwind, schraubt sich wiederum höher und so fort. Diese Flugtechnik kostet verhältnismäßig wenig Energie. Da geeignete Thermik nur über Land herrscht, müssen die Vögel das Meer möglichst meiden und können nur am Tag und bei günstigem Wetter ziehen. Erst wenn die Aufwinde am Nachmittag nachlassen, fallen die Störche zur Rast ein. Und am nächsten Vormittag fliegen sie weiter.

Nur bei sehr schlechtem Wetter legen sie zwischendurch einen Ruhetag ein. Auch fressen sie auf den Rastplätzen höchstens bei gutem Angebot viel. In Israel, wo mitunter an einem Tag 100 000 Störche ankommen, nehmen sie überhaupt keine Nahrung zu sich, sondern trinken allenfalls bei großer Hitze.

Dieses Verhalten war eine Überraschung. Viele Vögel, auch die meisten Singvögel, ziehen vor allem nachts und rasten zwischendurch oft mehrere Tage. Diese Arten zehren auf dem Zug von beträchtlichen Fettdepots, die sie dann bei einer Rast wieder auffüllen.

Störche haben eine völlig andere, bisher unbekannte Strategie. Sie gehen ohne bedeutende Fettreserven auf die Reise, wie wir mit tomografischen Auf-

OBEN: USHER / PREMIUM ; UNTEN: VOGELWARTE RADOLFZELL / KARTE: THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Störche ziehen gewöhnlich in großen Schwärmen. Die mit Sendern ausgestatteten Vögel sind an Rastplätzen an der aus dem Rückengefieder stehenden Sendeantenne zu erkennen, wie auch im unteren Bild (ganz links) der Jungvogel auf dem Nest. Erst die Telemetrie-Studien erwiesen, dass ein Storch auf dem Weg- und Heimzug nicht exakt denselben Weg fliegt.

nahmen nachwiesen. Und auch auf dem Zug rasten sie immer nur kurz und fressen wenig. Dafür fliegen sie so rasch wie möglich zum Ziel.

Zu den interessantesten Forschungsgebieten gehört, wie Vögel sich auf dem Zug orientieren. Beim Wegzug ins Wintergebiet müssen sie zumindest die grobe Richtung einhalten, beim Heimzug aber sogar den Ort wiederfinden. Schon früher hatten Studien an Käfigvögeln erbracht, dass Zugvögel im Herbst danach streben, in eine bestimmte Himmelsrichtung zu fliegen. Auf dem Zug selbst machen sie aber oft große Bögen oder auch scharfe Winkel. Teilweise umgehen sie so Gebirge, Wüsten oder große Wasserflächen. Nun zeigten die Telemetrie-Studien, dass Störche – und ebenso viele andere Vögel – weite Strecken dennoch erstaunlich geradlinig zurücklegen. Auf den 2500 Kilometern von Ostdeutschland bis zum Golf von Iskenderun im Süden der Türkei weichen die Störche von einer Geraden nur um wenige Prozent ab. Auch in Afrika fliegen sie die ersten 2000 bis 3000 Kilometer auf einer geraden Linie. Demnach verfügen sie über ein vorzügliches inneres Kompass-System. Flusstäler oder Gebirgszüge haben als Leitlinien offenbar keine besonders große Bedeutung.

Um in die Heimat zurückzufinden, hätten Störche im Prinzip zwei Möglichkeiten. Sie könnten sich nach Landmarken richten, die sie vom Hinflug her kennen. Sie könnten ihren Kurs aber auch unabhängig davon per Navigation bestimmen, das heißt den Heimatort zum Beispiel über die Stellung von Himmels- ▶

Satelliten-Telemetrie für Zugvögel

Neues Zeitalter der Vogelforschung

Als das satellitengestützte Ortungs- und Sammelsystem Argos in den siebziger Jahren eingerichtet wurde, war es dazu vorgesehen, marine und atmosphärische Daten zu sammeln. Die ersten Sender wogen einschließlich Batterie mindestens ein Kilogramm. Anfang der achtziger Jahre begannen Zoologen das System zu nutzen, um Tiere auf ihren Wanderungen zu beobachten. Zuerst erhielten nur große Säuge- und Meerestiere die schweren Sende-Ausrüstungen: darunter Eisbären, Karibus, Kamele, Seekühe, Meeresschildkröten und Haie.

Zu Beginn der achtziger Jahre entwickelten die USA für kleine Flugkörper Sender von weniger als 200 Gramm. 1990 standen ähnlich leichte Sender in Japan zur Verfügung. Diese erprobten Ornithologen an großen Vögeln. Mitte der achtziger Jahre begannen amerikanische Studien am Pfeif- und Trompeterschwan, Riesensturmvogel und Weißkopfseeadler. Französische Wissenschaftler führten ab diesem Jahr Studien an Wanderalbatrossen im südlichen Indischen Ozean durch.

Ebenfalls 1990 arbeitete die Vogelwarte Radolfzell zusammen mit dem Ornithologen Eugeniusz Nowak erstmals mit diesem System. In unserem ersten Projekt versahen wir Zwergschwäne mit Satelliten-Sendern und konnten die Vögel in Etappen von Holland bis Sibirien orten. Danach erprobten wir die Technik bei einem Gänsegeier in Spanien.

Die Versuche waren so erfolgreich, dass wir nun mit den inzwischen noch kleineren Sendern das Storchenprojekt beginnen konnten. Die Störche tragen an der heute verwendeten Sendervorrichtung, die alles in allem 35 Gramm wiegt, nur etwa ein Prozent ihres Körpergewichts. Gründliche Vorstudien erwiesen, dass diese Sender und die Halterung – eine Art Rucksack aus Teflonbändern, der im Gefieder verschwindet – die Vögel überhaupt nicht in ihrem Verhalten beeinträchtigten. Die herausstehende Antenne putzen sie wie ihre Federn.

Früher begrenzte insbesondere die Kapazität der Batterien die Lebensdauer der Sender. Seit wir Akkumulatoren verwenden, die über Solarzellen gespeist werden, können die Sender nicht nur viel leichter sein, sondern im Prinzip auch jahrelang in Betrieb bleiben. Mit Sendern dieser Größenordnung untersuchen Ornithologen nun weltweit Dutzende von Vogelarten, die über 600 Gramm wiegen, darunter eine Reihe von Greif-, Wasser- und Hochseevögeln bis hin zu Pelikanen und Pinguinen. Mitarbeiter von Radolfzell erforschen Kranich, Schwarz- und Schwarzschnabelstorch, Flamingo, Streifengans, Auerhuhn, Gänsegeier, Heringsmöwe und verschiedene Sturmtaucher.

Noch sind die Sender nicht klein genug, um das Heer der Singvögel und anderen kleinen Zugvögel auszustatten. Vielleicht wird es aber in Zukunft centgroße Sender geben, die wenigstens einmal am Tag ein Signal abgeben.

Die Sender müssen auch noch robuster werden, haben sie teils doch Tempe-



DELPHO / OKAPIA

raturschwankungen von minus 50 bis plus 60 Grad auszuhalten. In der Entwicklung sind bereits auch Sender, deren Aktivität sich während des Betriebs steuern lässt, sodass beispielsweise eine jeweils günstige Sendefrequenz eingestellt wird und der Forscher bestimmt, wann er Daten braucht und wann der Sender ruhen kann.

Die beweglichen Mini-Sendestationen der Zukunft werden zusätzlich winzige Kameras, Mikrofone und verschiedenste Sensoren tragen, sodass zugleich genaue Flug- und Wetterdaten sowie physiologische Werte des Vogels erfasst werden. Das erlaubt Rückschlüsse etwa auf Stressfaktoren und die Rastplatzqualität. Auch manche Aspekte des Verhaltens der Tiere untereinander lassen sich so vielleicht unverfälschter erfassen als bisher.

Noch sind die Kosten dieser Technik erheblich. Sie dürften aber umso mehr sinken, je breiter und häufiger die Satelliten-Telemetrie Anwendung findet. Das gilt ebenso, wenn erst mehr Satellitenbetreiber um die Nutzer konkurrieren.



Der Weißkopfseeadler setzt zum Fischfang an.

körpern oder mit Hilfe des Erdmagnetfelds gewissermaßen anpeilen. Dazu müssten sie die Koordinaten ihres Aufenthaltsortes mit denen des Heimatortes in Beziehung setzen können. Es sieht tatsächlich so aus, als könnten Störche echte Navigation nutzen. Sie fliegen zwar auf dem Wegzug und dem Heimzug oft in demselben engen Korridor, doch weichen sie manchmal deutlich von der früheren Route ab. Welche physikalischen Parameter Störche beim Navigieren verrechnen, ist allerdings noch nicht sicher.

Gleiches haben Untersuchungen anderer Arten ergeben. Manche Vögel ziehen auf dem Hin- und Rückflug einen völlig anderen Weg oder fliegen sogar riesige Schleifen – offenbar wählen sie jeweils die Route mit den günstigeren Umweltbedingungen. Eilen sie dann die letzten 1000 Kilometer in gerader Strecke heim, zeigt dies, dass sie die Richtung ihres Brutgebiets genau kennen.

Nur noch 20 000 Brutpaare

Ein Zugvogel hat drei Lebensräume: das Brutgebiet, den Zugweg und das Winterquartier. Bei bedrohten Arten gilt es alle drei Räume zu schützen. Auch der Weißstorch leidet nicht nur unter der modernen Landwirtschaft und Lebensweise des Menschen in Europa. Viele Störche gehen auf dem Zug oder in den afrikanischen Ruhegebieten verloren, sei es durch Bejagung – die bei den großen Schwärmen nicht schwer ist –, sei es durch Nahrungsmangel wegen Dürre (wie zeitweise in der Sahelzone) oder infolge Schädlingsbekämpfungsmaßnahmen gegen Nagetiere und vor allem Wanderheuschrecken, die zu ihrer wichtigsten Beute gehören. Noch ist nicht geklärt, wie stark den Störchen Pestizide in der Nahrungskette schaden.

Bereits im 19. Jahrhundert bemerkten Vogelkundler, dass die Bestände des Weißstorchs abnahmen, der früher in jedes Dorf, auf jede Wiese gehörte. Nicht zuletzt wegen dieses mancherorts drastischen Rückgangs formierten sich die ersten Vogelschutzverbände, kamen die ersten Vogelschutzgesetze auf und entstanden die ersten Schutzkonzepte.

Doch trotz aller Bemühungen dünnten die Storchenpopulationen im westlichen Europa während des 20. Jahrhunderts immer mehr aus. In den achtziger Jahren waren die Bestände von ehemals einigen hunderttausend Brutpaaren auf 20 000 Paare zusammengeschmolzen. Die meisten Störche Westeuropas leben heute in Spanien. In der ehemaligen Bundesrepublik brüteten Mitte der achtziger Jahre nur noch gut 600 frei leben-

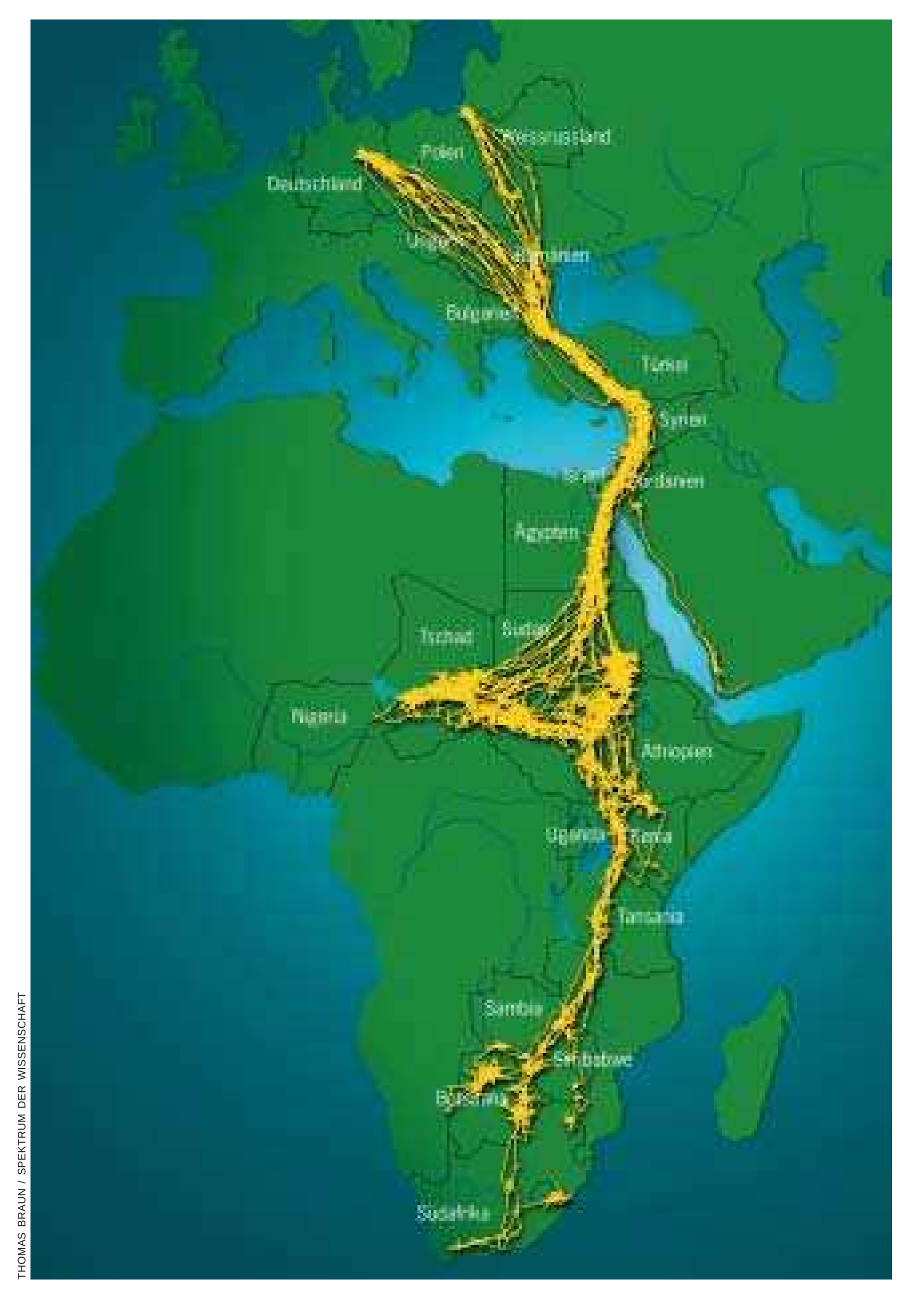


BLICKWINKEL

Der Zug des seltenen Mandschurenkranichs war bisher kaum erforscht. Neue Erkenntnisse über sein Zugverhalten wie auch das anderer asiatischer Kraniche sollen zum Schutz der anspruchsvollen Vögel genutzt werden.

de Paare. In einigen Ländern war der Weißstorch sogar ausgestorben: in der Schweiz und in Holland, auch in Rheinland-Pfalz, Hessen und im Saarland. In Dänemark gab es 1998 nur noch drei Brutpaare von ehedem hunderten. Mit Auswilderungen und Nisthilfen ließen sich zwar die dezimierten Bestände halten oder in manchen Regionen auch wieder vergrößern, doch bleiben die Zahlen niedrig. Viele Weststörche ziehen in der Regel höchstens ein oder zwei Junge auf – zu wenig, um zumindest die großen Verluste auf dem Zug auszugleichen.

Dagegen haben die Populationen in Ostdeutschland und Osteuropa heute noch über hunderttausend Brutpaare, die durchschnittlich drei Junge aufziehen. Besonders in den ehemaligen Ostblockländern scheinen die Lebensbedingungen für Störche noch günstig zu sein. Zu befürchten ist allerdings, dass sich dies leider unter verbesserten Wirtschaftsbedingungen und besonders nach der Ost- ▶



THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Zu den überraschendsten Ergebnissen des Storchenprojekts zählt der Aufenthalt vieler Störche im Tschad und im Westsudan, hier an den Flugrouten von dreißig Vögeln gut zu erkennen. Ringfunde aus diesem großen Gebiet wurden in Europa praktisch nicht bekannt.

erweiterung der EU rasch ändern wird. Deswegen soll das im Rahmen der Bonner Konvention geplante Schutzkonzept für den Oststorch auch die Brutverhältnisse umfassen.

Zu den erfreulichen Ergebnissen unseres Forschungsprojektes gehört, dass die Vertragsstaaten Südosteuropas und des Nahen Ostens durchziehenden Störchen zwar Rastgebiete für die Nacht bieten müssen, nicht aber reichhaltige Nahrungsgründe. Dies erleichtert die Verhandlungen außerordentlich.

Allerdings müssen die Störche auf ihrem ersten großen Zwischenstopp im Sudan und im Tschad unbedingt genügend Nahrung vorfinden. Denn in den dortigen Savannen bleiben sie ein bis zwei Monate lang und legen sich beträchtliche Fettreserven zu. Diese scheinen sie in den Gebieten zu brauchen, in denen sie den Rest des Winters verbringen – offenbar ist das Nahrungsangebot dort unsicher. Die meisten Störche ziehen später im Schwarm weiter nach Süden, nach Kenia oder Tansania, und manchmal noch im Dezember bis an die Südspitze Afrikas.

Der heutige Vogelzug in Europa hat sich in vielen Einzelheiten in Anpassung an die steten Klimaveränderungen nach der letzten Eiszeit entwickelt. Bis heute beobachten wir, wie sich Brutgebiete verschieben und Zuggewohnheiten ändern. Dass es Vögeln Vorteile bringt, jahraus, jahrein enorme Flugstrecken zurückzulegen, mag besonders für arktische Arten einsichtig erscheinen. Die nördlichen Tundren bieten ihnen im Sommer sehr reiche Nahrungsgründe, die sie wegen der langen Tagesdauer auch gut nutzen können, um ihre Brut in wenigen Wochen großzuziehen. Den Winter müssen viele Vogelarten jedoch in südlichen Gefilden verbringen, auch wenn dort das Nahrungsangebot durchaus nicht immer optimal ist.

Rekord: über 40000 Kilometer

Jedes Jahr begeben sich weltweit schätzungsweise rund 50 Milliarden Vögel zweimal jährlich auf den Zug. Von den heute lebenden etwa 10000 Vogelarten sind über die Hälfte zumindest teilweise Zugvögel, von denen viele ganze Kontinente überqueren – wobei die Küstenseeschwalbe, die von der Arktis des Nordpazifiks bis zur Antarktis wandert, mit rund 40000 Kilometern im Jahr den Rekord hält.

Noch immer gibt es auf der Landkarte des Vogelzugs große weiße Flecken. Das betrifft etwa entlegene Gebiete in Zentralasien, China und Indien. Von manchen seltenen Arten kennen wir nicht einmal die Brutgebiete und von einer Reihe auch nicht die Zugrouten.

Gerade in Asien zeigen sich die Vorteile der Satelliten-Telemetrie als Hintergrund für den Vogelschutz. Zu den ersten untersuchten Vogelarten gehörten Kraniche, die an ihren Lebensraum sehr hohe Ansprüche stellen. Etwa die Hälfte ihrer weltweit rund 15 Arten sind bereits erheblich dezimiert oder an sich selten. Manche von ihnen haben nur kleine Brut- und Wintergebiete und meist auch sehr schmale Zugkorridore, sind also schon deshalb besonders gefährdet. Von einigen asiatischen Arten wusste man bisher sehr wenig über die Zugwege oder die meisten Brutplätze. Einige davon wurden inzwischen gefunden. Zu den dringlichsten Aspekten der Schutzmaßnahmen gehört nun, die Bevölkerung der Durchzugsgebiete über die Seltenheit dieser Vögel zu informieren, um sie von der Bejagung abzuhalten.

Der amerikanische Präriebussard wurde zu Telemetrie-Studien aus Not er-


VOGELWARTE RADOLFZEL

Der junge Gänsegeier erhielt zusätzlich zu einem Satellitensender eine rote Flügelmanschette, um den Vogel bei Verlust oder Ausfall des Senders wiederzufinden. Mit dieser Austattung streifte er in Nordspanien 2000 Kilometer umher.

koren, weil die Brutpaare in Nordamerika seit einiger Zeit unerklärlicherweise drastisch weniger wurden. In den Brutgebieten ließ sich keine Ursache dafür erkennen. Darum wurden Vögel mit Sendern versehen und bis in die Winterquartiere in Südamerika verfolgt. In Argentinien stießen die Forscher auf den wahrscheinlichen Grund für den Schwund der Populationen. Sie orteten dort bewegungslose Sender und fanden dann schätzungsweise 5000 tote Bussarde. Sie vermuteten 20000 Todesopfer, so viel wie der halbe Brutbestand Kanadas. Offenbar hatten sich die Vögel vergiftet, als sie mit Pestiziden verseuchte Tiere fraßen. Verhandlungen haben inzwischen bewirkt, dass die Argentinier in den Überwinterungsgebieten weniger Schädlingsbekämpfungsmittel einsetzen.

Die Satelliten-Telemetrie hat sich in der Vogelzugforschung trotz der immer noch erheblichen Kosten erstaunlich rasch durchgesetzt. Endlich kann die Forscherneugier lange Strecken mit den Vögeln mitwandern. Schon mehrfach haben die Vögel uns dabei gezeigt, dass wir ihre Flugstrecken bisher erheblich unterschätzt haben. Zwergschwäne, die in Westeuropa überwintern und in Nordsibirien brüten, ziehen tatsächlich Hunderte von Kilometern direkt über die Ostsee. Unerwartet kam auch der Befund, dass Gänsegeier von den Pyrenäen bis nach Zentralspanien wandern. Besonders aber staunten französische Forscher, als Wanderalbatrosse, die im Südatlantik nahe der Antarktis auf den Crozet-Inseln brüten, auf der Nahrungssuche etwa nach kleinen Tintenfischen am Tag bis zu tausend Kilometer zurücklegten. Der monatliche Durchschnitt betrug rund 15000 Kilometer – zehnmal so viel wie bisher angenommen.

In wenigen Jahren ließen sich die enorm langen Zugrouten des Steppenadlers von Brutgebieten in Sibirien bis in die Ruheziele im südlichen Afrika recht genau ermitteln. Ornithologen fanden ostasiatische Winterquartiere des Riesenseeadlers, der in Nordostsibirien brütet, und die bisher unbekannten Winterquartiere des Wahlbergadlers in Südwestafrika. Im nördlichen Eismeer entdeckten sie bisher unbekannte Mauserplätze der Plüschkopfente. Erkundet wurden auch Zugwege der Schnee-Eule und verschiedener Sturmtaucher, sowie Aufenthaltsorte und Zugbewegungen von Jungstörchen und Kranichen bis zur Brutreife.

Sicher hat die Satelliten-Telemetrie ihre große Zeit in der Ornithologie noch vor sich. Je kleiner die Sender werden, umso mehr miniaturisierte weitere Geräte, etwa Kameras oder Mikrofone, lassen sich an die Technik koppeln, mit denen sich das Verhalten der Vögel und ihre Umgebung aus weiter Ferne beobachten lassen. Noch träumen wir nur davon, auch Kleinvögel mit Satellitensendern auszustatten, die immerhin das Heer der Zugvögel ausmachen.

Die Störchin Prinzesschen ist in diesem Frühjahr wieder 10000 Kilometer weit geflogen. Als wir ihr vor acht Jahren erstmals auf dem Zug folgten, war sie etwa 6 Jahre alt. Da Störche 25 Jahre alt werden, könnte sie uns mit viel Glück auch in den nächsten Jahre zeigen, was in ihrer Welt zählt. ■

Literaturhinweise

Vogelzug. Eine kurze, aktuelle Gesamtübersicht. Von Peter Berthold. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1992.

Eine neue Dimension der Vogelforschung: Die Satelliten-Telemetrie. Von Peter Berthold, Eugeniusz Nowak und Ulrich Querner in: Der Falke, Bd. 44, Heft 5–6, 1997, S. 134.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*



Peter Berthold *ist seit 1998 Direktor der Vogelwarte Radolfzell am Bodensee, Max-Planck-Forschungsstelle für Ornithologie. Seit 1981 hat er eine Professur für Biologie an der Universität Konstanz.*
Ulrich Querner *ist seit 1976 technischer Mitarbeiter und Fotograf an der Vogelwarte und Forschungsstelle in Radolfzell.*

Das kleinste Großlabor der Welt

Mit so genannten DNA-Chips entschlüsseln Forscher Krankheiten und entwickeln neue Medikamente. Das Fernziel lautet: für jeden Patienten die individuelle Therapie.

Von Stephen H. Friend und Roland B. Stoughton

Zunächst sieht alles gut aus: Den meisten der etwa 25 000 Menschen, die jedes Jahr an dem „diffuses großzelliges B-Zell-Lymphom“ genannten Krebs erkranken, bringt die übliche Chemotherapie anfänglich Hilfe. Doch bei mehr als der Hälfte von ihnen kehrt der Krebs zurück und verläuft dann tödlich. Als Ursachen dieser Differenz vermuten Mediziner schon seit langem Varianten in den molekularen Veränderungen der entarteten Zellen. Bis vor zwei Jahren hatten sie aber keine Möglichkeit, jene Patienten mit der besonders bösartigen Krebsform auszumachen und dann mit einer intensiveren, aber auch riskanten Therapie zu behandeln. Erst ein neues Werkzeug der Molekularbiologie, der so genannte DNA-Chip, auch Mikroarray oder Biochip genannt, bietet einen Weg aus der Sackgasse.

Eine ganze Reihe von Unternehmen weltweit vertreibt mittlerweile solche Chips, Zubehör oder Computerprogramme für die Datenauswertung, denn seit ihrer Markteinführung 1996 haben sich DNA-Chips zu einem lukrativen Geschäft entwickelt: Sie helfen Wirkstoffe mit schädlichen Nebenwirkungen zu vermeiden, revolutionieren die Erkundung



Die Auswertung von Biochips liefert ein buntes Punktemuster, das eines Tages genau Auskunft über die beste Behandlung für jeden einzelnen Patienten liefern soll.

normaler und krankhafter Abläufe in Zellen und sollen eine genauere Diagnose ermöglichen. Noch ist es Zukunftsmusik, doch die Branche hofft, dass Chips eines Tages für jeden Patienten das optimale Medikament gegen seine jeweilige Krankheit finden werden.

Es gibt verschiedene Ausführungen, doch bei allen werden DNA-Fäden – und zwar einzelne Stränge, nicht die Doppelhelix – auf einem Träger nebeneinander gereiht, der oft nicht größer ist als eine Euro-Münze. Mit diesen Sonden fischt der Chip gezielt genetisches Material aus einer aufbereiteten Gewebeprobe. Dabei bedient er sich einer besonderen Eigenschaft unserer Erbsubstanz: der komplementären Basenpaarung.

In fast jeder menschlichen Zelle befinden sich über 30 000 Gene als Baupläne für Proteine. Der genetische Text ist die DNA, und seine Buchstaben sind ihre vier verschiedenen informationstragenden Bausteine Adenin, Cytosin, Guanin und Thymin, die üblicherweise mit A, C, G und T abgekürzt werden. Diese vier organischen Basen sind über ein Zucker-Phosphatrückgrat in einer ganz genau bestimmten Reihenfolge zu einer langen Kette verknüpft. Doch jede Base kann zusätzlich zu den festen Bindungen mit ihren beiden Nachbarn noch über so genannte Wasserstoffbrücken eine lockere Bindung mit einer weiteren Base eingehen. Dabei ist sie wählerisch. So bilden nur A mit T und C mit G solche Paare aus; man spricht von komplementären Basen. Deshalb paaren sich auch DNA-Stränge nur dann gut, wenn die jeweilige Abfolge von Basen komplementär zu der des anderen Stranges ist. Lautet die Sequenz einer Sonde auf dem Chip beispielsweise ATCGGC und bindet sich ein DNA-Stück aus einer Gewebeprobe daran, muss es folgerichtig die Sequenz TAGCCG tragen.

Freilich gehört dieses Prinzip längst zum Repertoire biologischer Testverfahren. Das Besondere an Biochips ist, dass sie Zehntausende derartiger Messungen gleichzeitig durchführen können. Jeder ▶



DENNIS GALANTE PHOTOGRAPHY

einzelne Sondentyp – das kann ein ganzes Gen oder ein kürzeres Stück Erbsubstanz sein – sitzt dabei an einer definierten Stelle auf einem schachbrettartigen Gitter. Die DNA-Moleküle der Lösung, die auf den Chip kommt, tragen einen Fluoreszenzfarbstoff oder eine andere Markierung. Was nicht am Chip haften bleibt, wird abgespült. Nachdem ein Detektor die Oberfläche auf Markierungen abgetastet hat, wandelt ein Computerprogramm die Rohdaten – die Nummer der Gitterzelle mit beispielsweise der jeweiligen Intensität der Fluoreszenzstrahlung – in eine farbcodierte Darstellung um (siehe Kasten rechts). Das klingt freilich einfacher, als es in der Praxis ist. Forscher weltweit arbeiten unter anderem an Verfahren, die Sonden fest und gleichmäßig verteilt in der Gitterzelle zu binden; gleichzeitig müssen sie verhindern, dass etwas davon auf den Glasträger gelangt und die Messung durch ein „Hintergrundrauschen“ stört.

Grundlagenforscher vergleichen auf diese Weise die DNA auf dem Chip mit der in einer Probe und überprüfen so, welche Gene sich darin befinden, oder sie bestimmen mit bekannten Sonden die Reihenfolge der Basen in unbekannter Erbsubstanz. Den Vergleich von Gen-Sequenzen nutzen Forscher sogar zum Vergleich verschiedener Organismen, um Hinweise auf deren Evolution zu finden. Und die Analyse von Tumoren sowie gesundem Gewebe lieferte eine Reihe feiner Unterschiede bezüglich der Zahl und Zusammenstellung kritischer Gene.

In nicht zu ferner Zukunft dürften DNA-Chips auch in der medizinischen Praxis zu Hause sein. Mit einem sorgfältig ausgewählten Arrangement könnte man zum Beispiel bei einem Patienten, dessen Grippe-ähnliche Symptome (wie Kopf- und Gliederschmerzen, hohes Fieber und Schwierigkeiten beim Atmen) auf keinen eindeutigen Erreger hinweisen, die genaue Krankheitsursache herausfinden. Die Oberfläche des Chips würde dazu mit DNA-Stücken besetzt, die nur zu Genen in Frage kommender Mikroorganismen passen, und ein medizinisches Laboratorium könnte etwa aus der Nasenschleimhaut des Patienten Erbsubstanz extrahieren und mit Markierungen für den Nachweis versehen. Bindet die Proben-DNA an die komplementäre auf dem Chip, verrät dies, welcher Erreger die Krankheit ausgelöst hat.

Mikroarrays können auch die genetisch bedingte Anfälligkeit eines Menschen für Krankheiten nachweisen. Verschiedene Personen unterscheiden sich in ihrer genetischen Anlage nur um einzelne DNA-Basen, so genannte SNPs (für *single nucleotide polymorphisms*, gesprochen „Snips“). Bestückt man den Chip mit DNA-Abschnitten aus Gen-Varianten, die Krankheiten auslösen können, lässt sich eine Wahrscheinlichkeit dafür angeben, dass ein Mensch eines Tages an Alzheimer, Diabetes oder bestimmten Krebsarten erkrankt.

Ein Chip verrät, ob sich eine Krankheit entwickelt

Verstärkte Kontrolle, intensive Vorsorge und falls nötig frühe Therapie könnten dem vorbeugen oder zumindest den Verlauf mildern. Zwar bergen solche Tests das Risiko eines Missbrauchs durch Arbeitgeber und Versicherer, in der Forschung sind sie aber bereits ein begehrtes Werkzeug. Jörg Hoheisel, Leiter der Abteilung „Funktionelle Genomanalyse“ am Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ) in Heidelberg, ist ein Pionier auf diesem Gebiet. Seine Doktorandin Simone Würtz entwickelte eine Technik, um Varianten im so genannten BRCA1-Gen aufzufinden, die Brustkrebs mitverursachen. Sie verankerte wie gehabt charakteristische Sequenzen solcher Gene auf dem Chip, fand aber nur eine geringe Empfindlichkeit der Messung. Das änderte sich, als sie so genannte Primer der Gene benutzte. Das sind kurze Starter-DNAs zum Kopieren der Stränge. Sie brachte jeweils nur eine Veränderung ein, und zwar immer am Ende der Sequenz. Damit gelang ein empfindlicher Varianten-Nachweis.

SNP-Chips können noch mehr. Es hängt nämlich von der Gen-Variante eines Patienten ab, wie sein Körper eine medizinische Substanz verarbeitet, und das heißt: ob sie hilft und welche Nebenwirkungen sie zeigt. Ein Chip, der die individuellen genetischen Schwachstellen verrät, könnte den Arzt bei der Auswahl jener Arznei unterstützen, die für den gerade zu behandelnden Patienten am wirkungsvollsten und zugleich am verträglichsten ist. Eine weitere Anwendung wären SNP-Chips, um genetische Veränderungen, die Tumoren besonders aggressiv machen, frühzeitig anzuzeigen. Pathologen könnten damit erkennen, welche Geschwulste trotz eines harmlos erscheinenden mikroskopischen Bildes in Wahrheit bösartig sind.

Nicht minder aufregend für die Forscher ist eine zweite wichtige Anwendung der DNA-Chips: das Erstellen so genannter Expressionsprofile. Diese zeigen an, welche Gene einer Zelle zum Zeitpunkt der Probenahme aktiv waren, das heißt zur Proteinsynthese abgelesen werden. Dabei erstellt die Zelle spezielle RNA-Kopien der Gene. Diese Boten-RNA-Moleküle dienen dann als Blaupausen für die Proteinsynthese. Erfreulicherweise gilt das Prinzip der komplementären Basenpaarung auch für RNA-Moleküle. Ein Biochip kann also indirekt über die RNA-Kopien der Gene ermitteln, welche Proteine gerade gebraucht werden, und auch, in welcher Quantität: Je mehr RNA von einem Typ vorhanden ist, desto mehr entsprechende Eiweißmoleküle produziert die Zelle. Weil Proteine an den meisten biochemischen Vorgängen in der Zelle und in den Geweben beteiligt sind, verraten diese Daten viel über den Zustand und die Abläufe auf molekularbiologischer Ebene. Es gibt auch Versuche, den Proteinmix ohne den Umweg über die DNA zu erkunden, doch auf diesem Gebiet stehen die Entwickler solcher Chips noch am Anfang (siehe Kasten Seite 66).

Der indirekte Weg führt dennoch zu wertvollen Resultaten. Indem Forscher die Genaktivität eines Zelltyps anhand schnappschussartiger Expressionsprofile verfolgen, erfahren sie beispielsweise, wie sich Zellfunktionen bei Krankheit oder durch Medikamente verändern. Und wenn Biologen ein Gewebe unterschiedlichen Bedingungen aussetzen, können sie anschließend anhand der dann wohl vorherrschenden Proteinsorten Rückschlüsse darauf ziehen, wie die Zellverbände normalerweise Störungen ausgleichen, und was schief geht, wenn sich eine Krankheit entwickelt

Gleichzeitig eignen sich DNA-Chips besser als andere Methoden dazu, die Funktion noch ganz unbekannter Gene zu erkunden, die im Rahmen des Humangenom-Projektes auf der menschlichen DNA durch Sequenzanalyse gefun- ▶

Stichwort

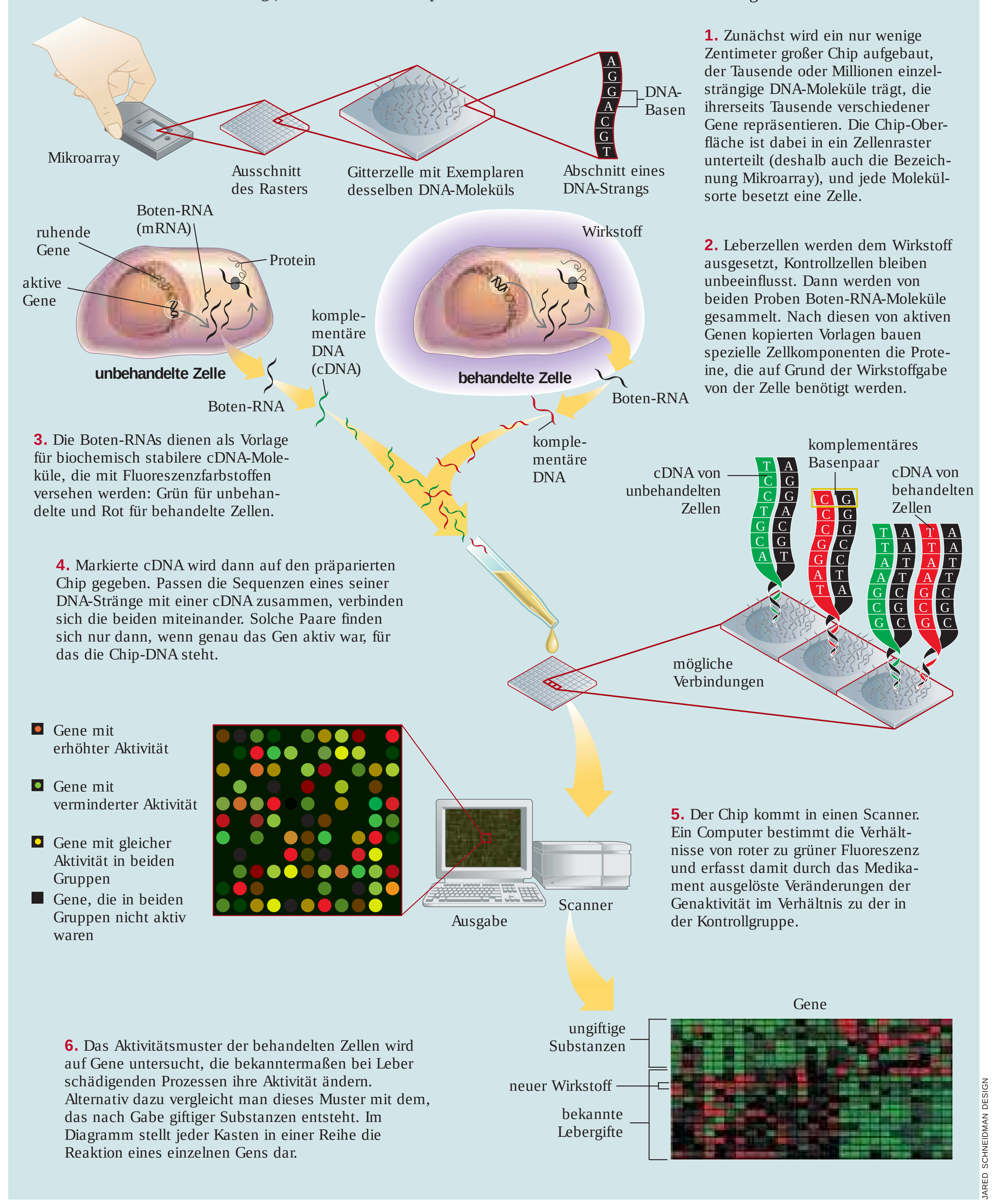
Biochips können Zehntausende DNA-Fragmente auf engstem Raum tragen. Jedes einzelne fischt als ganz spezifische Sonde passende Stücke von DNA oder RNA aus einer Gewebeprobe. Die Chips weisen so Gene in der Probe nach oder messen deren Aktivität.

Diese Kenntnis soll dabei mithelfen, komplexe Krankheiten wie Krebs besser zu verstehen und wirksame Medikamente mit weniger Nebenwirkungen zu entwickeln. Außerdem werden Chips als Werkzeuge für eine schnelle Diagnose und die Wahl der richtigen Therapieform erwogen.

Auch **Protein-Chips** für die biologische Forschung und die medizinische Diagnose sind in der Entwicklung. Ein wichtiges Ziel der Forschung an molekularen Chips ist die individuelle, auf den Patienten abgestimmte Therapie.

Wie DNA-Chips arbeiten

Um schnell zu testen, ob ein neuer Wirkstoff die Leber schädigen würde (die auch den Abbau von Medikamenten bewerkstelligt), könnten Forscher prüfen, welche Gene die Substanz aktiviert. Verhält sie sich genauso wie Stoffe, deren schädigende Wirkung bereits bekannt ist, wäre dies ein deutliches Alarmsignal.



1. Zunächst wird ein nur wenige Zentimeter großer Chip aufgebaut, der Tausende oder Millionen einzelsträngige DNA-Moleküle trägt, die ihrerseits Tausende verschiedener Gene repräsentieren. Die Chip-Oberfläche ist dabei in ein Zellenraster unterteilt (deshalb auch die Bezeichnung Mikroarray), und jede Molekülsorte besetzt eine Zelle.

2. Leberzellen werden dem Wirkstoff ausgesetzt, Kontrollzellen bleiben unbeeinflusst. Dann werden von beiden Proben Boten-RNA-Moleküle gesammelt. Nach diesen von aktiven Genen kopierten Vorlagen bauen spezielle Zellkomponenten die Proteine, die auf Grund der Wirkstoffgabe von der Zelle benötigt werden.

3. Die Boten-RNAs dienen als Vorlage für biochemisch stabilere cDNA-Moleküle, die mit Fluoreszenzfarbstoffen versehen werden: Grün für unbehandelte und Rot für behandelte Zellen.

4. Markierte cDNA wird dann auf den präparierten Chip gegeben. Passen die Sequenzen eines seiner DNA-Stränge mit einer cDNA zusammen, verbinden sich die beiden miteinander. Solche Paare finden sich nur dann, wenn genau das Gen aktiv war, für das die Chip-DNA steht.

5. Der Chip kommt in einen Scanner. Ein Computer bestimmt die Verhältnisse von roter zu grüner Fluoreszenz und erfasst damit durch das Medikament ausgelöste Veränderungen der Genaktivität im Verhältnis zu der in der Kontrollgruppe.

6. Das Aktivitätsmuster der behandelten Zellen wird auf Gene untersucht, die bekanntermaßen bei Leber schädigenden Prozessen ihre Aktivität ändern. Alternativ dazu vergleicht man dieses Muster mit dem, das nach Gabe giftiger Substanzen entsteht. Im Diagramm stellt jeder Kasten in einer Reihe die Reaktion eines einzelnen Gens dar.

Protein-Chips

Messen ohne Umweg

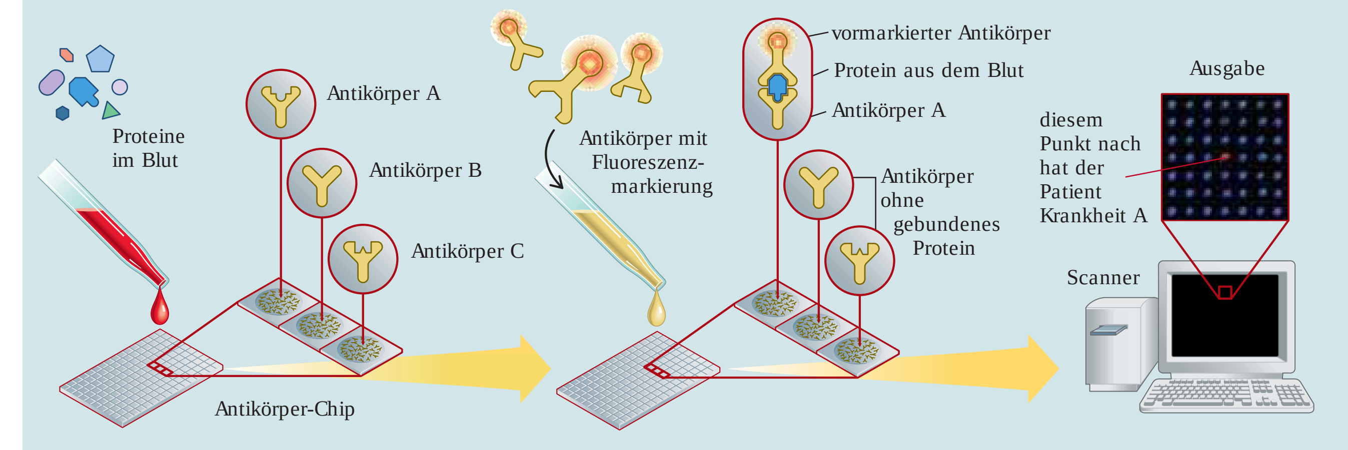
Im Aufbau sind sich DNA- und Protein-Chips ähnlich. Hunderte verschiedener Eiweißmoleküle sitzen an bestimmten Stellen eines Rasters auf einem dünnen Träger. Dem kommerziellen Einsatz am nächsten sind Chips, die dafür Antikörper verwenden (SdW 4/2002, S. 92). Das sind Moleküle des Immunsystems, die spezifisch an Abschnitte der nachzuweisenden Proteine binden. Bei der so genannten Sandwich-Methode hängt sich an den so entstehenden Komplex noch ein anderer Antikörper, der mit einem Fluoreszenzfarbstoff markiert ist.

Umgekehrt kann ein Chip mit Proteinen oder Proteinbruchstücken, so genannten Peptiden, Antikörper in einer Probe nachweisen. So entwickelten Wissenschaftler des Deutschen Krebsforschungszentrums in Heidelberg und der dortigen Universität ein Verfahren, Zecken-Borreliose-Infektionen differenzierter zu untersuchen. Bisherige Tests treffen nur Ja/Nein-Entscheidungen. Um etwa herauszufinden, welche der 100000 spezifischen Peptide der drei für Menschen gefährlichen Borrelien-Arten den Krankheitsverlauf beeinflussen, sucht ein Chip nach den vom Immunsystem dagegen produzierten Antikörpern. Dementsprechend muss er die passenden Peptide tragen. Zur Herstellung ließen sich die Forscher ein eigenes, patentiertes Verfahren einfallen: Sie schlossen je eine Sorte von Aminosäuren in „Tonerpartikel“ ein, die sie nach dem Prinzip eines Laserdruckers auf dem Chip auftragen. Beim Erhitzen eines solchen Partikels wird der „Toner“ zum Lösungsmittel, und die darin enthaltene Aminosäure klinkt sich an die zuletzt aufgetragene Aminosäure. Ort und Art der Aminosäure wechseln bei jedem Durchgang, und es entsteht die gewünschte Vielfalt.

Allerdings steht die Forschung mittels Protein-Biochips noch am Anfang, denn bisher sind nur wenige Proteine als Anzeichen für Krankheiten oder deren Verlauf identifiziert.

Klaus-Dieter Linsmeier
ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Antikörper auf einem Chip sollen Ärzten bei der Diagnose helfen



1. Das Blut eines Patienten kommt auf einen Protein-Chip, auf dem schachbrettartig angeordnet unzählige Antikörper fixiert sind. Jede Version bindet spezifisch eine Proteinsorte an diese Stelle auf dem Chip.

2. Antikörper eines zweiten Typs, welche die gesuchten Proteine an anderen Stellen binden, lagern sich an und es entsteht ein „Sandwich“. Sie tragen einen fluoreszierenden Farbstoff, mit dem sie leicht nachzuweisen sind.

3. Ein Scanner prüft, welche Antikörper Protein gebunden haben. Der auswertende Computer zeigt dann an, welche Infektion vorliegt.

JARED SCHNEIDMAN DESIGN

den wurden. Wenn als Reaktion auf eine Veränderung – wie zum Beispiel ein Medikament, eine Infektion oder eine erzwungene Mutation – eine Reihe von Genen gemeinsam an- oder abgeschaltet werden, sind sie vermutlich an den gleichen Regulationsmechanismen der Zelle beteiligt. Das gilt auch für ein unbekanntes Gen in diesem Sortiment.

Bei der Entwicklung von Arzneistoffen suchen Forscher auf diese Weise nach bislang nicht entdeckten Proteinen, die an Krankheitsprozessen beteiligt sind. Einmal gefunden gelten sie als mögliche Ziele für neue und womöglich bessere Wirkstoffe. So fahndete zum Beispiel Peter S. Linsley von Rosetta Inpharmatics nach Angriffszielen für Medikamente gegen Entzündungen, die ein fehlgeleitetes Immunsystem verursacht. Er konzentrierte sich auf Gene in den weißen Blutkörperchen, die gleichzeitig mit dem Gen für das Protein Interleukin-2 (IL-2) aktiviert werden. Das ist nämlich höchstwahrscheinlich an solchen Autoimmunkrankheiten beteiligt.

Ein Computerprogramm analysierte Expressionsprofile weißer Blutkörperchen, die Linsley verschiedenen chemischen Substanzen ausgesetzt hatte. Das Resultat: eine Liste von Genen, die zusammen mit dem IL-2-Gen an- und abgeschaltet wurden, darunter eines, dessen Funktion bislang noch unklar war. Zur gleichen Zeit bestätigten Forscher vom Pariser Pasteur-Institut mit einer anderen Methode, dass dieses Gen an denselben Vorgängen wie IL-2 beteiligt ist. Insgesamt scheint es ein geeigneter Angriffspunkt für Medikamente zu sein.

Auf der Suche nach besseren Verfahren zur Diagnose von chronisch lymphatischen B-Zell-Leukämien verzichten Peter Lichter vom Institut für Molekulare Genetik des DKFZ und Hartmut Döhner vom Institut für Innere Medizin III der Universität Ulm auf Boten-RNAs und verwenden die „genomische Hybridisierung“, das heißt, sie geben die komplette, markierte Erbsubstanz des Tumors auf fixierte DNA-Sonden. Typisch

für Tumoren ist nämlich oft, dass es von bestimmten Genen eine ungewöhnlich hohe Zahl von Kopien auf einem Chromosom der Krebszelle gibt. Für die genannte Form der Leukämie wurden zehn solcher Gene identifiziert. Bringt man die komplementären Sequenzen auf den Chip, wird veränderte Tumor-DNA sich daran häufiger binden als an Kontroll-Sonden. Unter dem Scanner leuchten diese Punkte dann heller. Einen solchen Chip herzustellen und auszuwerten ist wesentlich komplexer als die Analyse von Expressionsprofilen.

Pharmazeuten nutzen die einfachere Methode: Sie sondern damit aus der Vielzahl potenzieller Wirkstoffe jene Kandidaten aus, die vermutlich unerwünschte oder gar nicht zumutbare Nebenwirkungen hätten.

Fragen Sie Ihren Arzt oder Chip

Um beispielsweise zu prüfen, ob ein Kandidat das Herz schädigen würde, können die Forscher zunächst Expressionsprofile von Herzzellen anlegen, die unterschiedlichen Medikamenten und bekannten toxischen Verbindungen ausgesetzt waren. Behandeln sie dann Herzzellen mit dem fraglichen Wirkstoff, können sie das resultierende Aktivitätsmuster mit denen der Datenbank vergleichen. Ähnliche Muster sprechen für ähnliche Effekte.

Zugleich lässt sich so ergründen, warum ein Medikament bestimmte Nebenwirkungen hat. Eine drängende aktuelle Frage ist etwa, warum Protease-Inhibitoren, die das Leben von HIV-infizierten Menschen retten, außerdem leider die Konzentrationen von Cholesterin und Triglyceriden im Blut erhöhen, das Körperfett auf seltsame Weise umverteilen und eine Resistenz gegen Insulin hervorrufen können. Vor dem Hintergrund, dass die Leber die Produktion und den Abbau von Lipiden (zu denen auch Cholesterin und Triglyceride gehören) und lipidhaltigen Proteinen beeinflusst, untersuchten wir mit anderen Wissenschaftlern von Rosetta Inpharmatics sowie Roger Ulrich und seinem Team an den Abbott Laboratories, ob der Protease-Inhibitor Ritonavir einige seiner Nebenwirkungen über diesen Weg hervorruft.

Mit einem Chip, der rund 25 000 Ratten-Gene trug, stellten wir Expressionsprofile her, welche die Auswirkungen eines ganzen Sortiments von leberschädigenden Substanzen repräsentierten. Wir sortierten die verursachenden Stoffe nach der Ähnlichkeit ihrer Profile in Gruppen, wobei wir uns an etwa 2400 Genen orientierten, die sehr stark reagiert hatten. Dann behandelten wir Rattenleber mit Ritonavir und verglichen das resultierende Expressionsprofil mit unserer Sammlung.



Wir stellten fest, dass Ritonavir die Aktivierung von Genen bewirkt, die für gewöhnlich durch die Wirkung eines gut bekannten lipidsenkenden Mittels gedämpft sind. Außerdem senkt es die Produktion von Proteinen, aus denen normalerweise Proteosome (SdW 5/2001, S. 54) aufgebaut sind – Zellstrukturen, die nutzlos gewordene Proteine abbauen. Nach diesen Ergebnissen liegt der Schluss nahe, dass Ritonavir den Lipidspiegel in der Leber (und damit auch im Blut) zum Teil dadurch anhebt, dass es die Lipidsynthese in der Leber fördert und den Abbau lipidhaltiger Proteine unterdrückt. Noch sind Details unklar, doch wir hoffen, die Nebenwirkungen des wichtigen Medikaments bald reduzieren zu können.

Mehr Wirkstoffe und weniger Nebeneffekte – das wären schon große Erfolge für die Arbeit mit den kleinen Chips. Tatsächlich gibt es noch größere Versprechen: schnelle diagnostische Hilfsmittel, die Patienten mit ähnlichen Symptomen in Gruppen einteilen, die dann auf spezifische Weise behandelt würden. Wie die eingangs erwähnte Lymphom-Studie zeigt, benötigen vor allem Krebsspezialisten dringend Techniken, um jene Patienten herauszufinden, die von Anfang an eine aggressive Therapie brauchen.

Unsere Arbeitsgruppe hat zusammen mit Kollegen vom niederländischen Krebsinstitut in Amsterdam für die Brustkrebsforschung gezeigt, wie Expressionsprofile auf Biochips dazu beitragen können. Ein Test sollte klären: Welche jungen Patientinnen mit Brustkrebs in frühen Stadien (also ohne Befall der Lymphknoten) sollten sich nach der Operation einer Chemotherapie unterziehen, um die Bildung von Metastasen zu verhindern, und welche nicht? Denn obwohl heutzutage rund 90 Prozent der Patientinnen eine Chemotherapie bekommen, ist dies bei schätzungsweise 70 bis 80 Prozent von ihnen unnötig. Unglücklicherweise lassen sich die Risikofälle bislang nicht zuverlässig erkennen.

Wir begannen damit, Expressionsprofile der Tumoren von fast hundert Frauen aufzunehmen, deren Krankengeschichte mehr als fünf Jahre lang nach der Operation verfolgt worden war. Anfangs umfasste unser Chip 25000 menschliche Gene, doch zum Schluss hatten wir eine bestimmte Signatur von etwa siebzig Genen eingekreist, die ziemlich sicher anzeigte, dass es Metastasen geben würde. Das entgegengesetzte Profil sprach zudem stark für einen guten Verlauf. Offensichtlich sind einige Tumoren darauf „programmiert“ zu metastasieren, noch bevor sie die Größe eines Pfennigs erreichen, während manche größere Tumoren harmlos bleiben.

Unsere Ergebnisse müssen erst noch von anderen Arbeitsgruppen bestätigt werden, bevor die Analyse von Expressionsprofilen, mit DNA-Chips gewonnen, zum Standardverfahren bei Brustkrebs wird. Voraussichtlich werden viele medizinische Zentren innerhalb der nächsten zwei Jahre beginnen, Expressionsprofile als Hilfe bei der Suche nach einer passenden Therapie zu testen – nicht nur gegen Brustkrebs, sondern auch bei anderen Tumoren. Diese Technik könnte zudem bei der Gruppierung von Patienten mit Asthma, Diabetes oder Fettleibigkeit helfen, die individuell behandelt werden sollten. ■

Der Molekularbiologe **Stephen H. Friend** *gründete 1996 Rosetta Inpharamatics, um die DNA-Chip-Technologie weiterzuentwickeln und zu vermarkten.* **Roland B. Stoughton**, *promovierter Physiker, ist Seniorvizepräsident für Informatik bei Rosetta.*

Literaturhinweise

Experimental Annotation of the Human Genome using Microarray Technology. Von D.D. Shoemaker et al. in: Nature, Bd. 409, S. 922, 2001.

Genomics, Gene Expression and DNA Arrays. Von David Lockhart und Elizabeth Winzeler in: Nature, Bd. 405, S. 827, 2000.

Weblinks finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

Wenn der Atem nach Verwesung riecht

Seit Urzeiten haben Menschen schlechten Atem und versuchen, dem Übel mit allerlei wohlriechenden Kräutern beizukommen. Jetzt bringen Forscher frischen Wind in das anrüchige Gebiet.

Von Mel Rosenberg

Es gehört zu den Themen, über die man nicht spricht – selbst unter Freunden nicht. Wenn jemand übel aus dem Mund riecht, dann sind seine Mitmenschen bestrebt, dichten Kontakt von Angesicht zu Angesicht zu meiden und immer ein bisschen Abstand zu halten, ohne dass der Betreffende es merkt. Unbeabsichtigt nehmen sie ihm dadurch aber die Möglichkeit, etwas gegen den Mundgeruch zu tun – denn wer schlechten Atem hat, riecht das selbst nicht. Trotz gewissenhafter Mundhygiene und gesunder Zähne können sich unangenehme chemische Stoffe bilden, beispielsweise, wenn man den Tag über nur wenig isst und trinkt.

Schuld daran sind in den meisten Fällen Bakterien im Mundraum, die sich von den normalen Ansammlungen kleiner Tröpfchen auf dem Zungenrücken ernähren. Als Abfallprodukte ihres Stoffwechsels erzeugen die Mundbewohner eine ganze Reihe chemischer Verbindungen, die sich durch Gurgeln mit einem wirksamen Mundwasser und durch Reinigen der Zunge entfernen lassen, womit das Problem gemildert wäre. Sogar ein paar Bissen Nahrung zu kauen, würde schon helfen.

Schon immer war den Menschen Mundgeruch oder Halitose – vom lateinischen *halitus* für Atem und dem griechischen *-osis* für „krankhafter Zustand" – bekannt. Doch erst seit einiger Zeit erweist sich die Halitose als interessantes Forschungsobjekt für Wissenschaftler ganz unterschiedlicher Disziplinen, von der Bakteriologie über Chemie und Medizin bis hin zur Psychologie.

Millionen Menschen verströmen Mundgeruch, oft ohne es zu wissen, weshalb es schwierig ist, genaue Statistiken über die Verbreitung der Halitose aufzustellen. In einer kürzlich durchgeführten Studie an brasilianischen Studenten ermittelte Paulo Nadanovsky vom Institut für Sozialmedizin an der Universität Rio de Janeiro, dass 31 Prozent der Teilnehmer wenigstens ein Familienmitglied mit üblem Atem angeben. Mundgeruch hat ernste Konsequenzen: 24 Prozent der Teilnehmer sagten aus, dass es ihnen schwer fällt, die Gesellschaft des Familienmitglieds mit Halitose als angenehm zu empfinden, und 62 Prozent meinten, sie würden von dem Atemproblem ihres Verwandten mehr oder weniger beeinträchtigt.

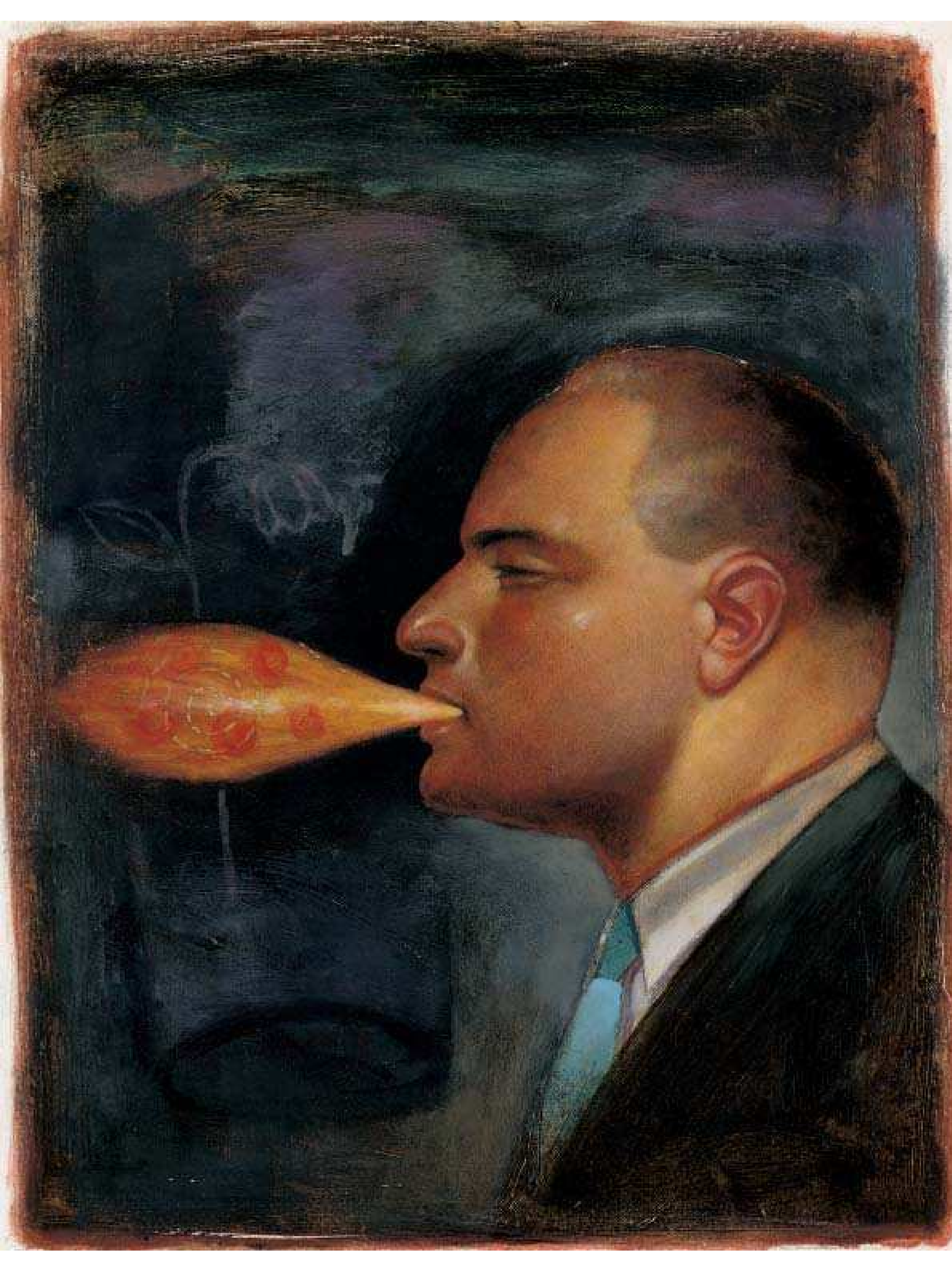
Mein eigenes Interesse an dem Thema begann vor fast zwanzig Jahren: Meine Arbeitsgruppe entwickelte aus einer chemischen Emulsion, die sich bei kräf-

Die schlimmsten Stinker

Von Mundbakterien produzierte Verbindungen – und wie sie riechen

Schwefelwasserstoff	faule Eier
Methylmercaptan	Fäkalien
Skatol	Fäkalien
Cadaverin	Leichen
Putrescin	faules Fleisch
Isovaleriansäure	Schweißfüße

ILLUSTRATION: JOSEPH DANIEL FIEDLER



tigem Schütteln einer zweiphasigen Flüssigkeit bildet, ein Mundwasser, das Bakterien der Mundhöhle an der Oberfläche winziger Öltröpfchen fangen sollte. Damals erforschten nur einige Wissenschaftler unter Leitung von Joseph Tonzetich von der University of British Columbia die Halitose – mittlerweile sind es Hunderte an Universitäten und in Privatfirmen. Im Juli letzten Jahres versammelte die International Society for Breath Odor Research (Isbor) rund 350 Teilnehmer zu ihrem fünften internationalen Kongress in Tokio.

Dieser Zuwachs spiegelt ein allgemeines – mitunter fast zwanghaftes – Interesse der Öffentlichkeit an frischem Atem wider. Einer Marktstudie zufolge gaben US-Amerikaner im Jahr 2000 etwa 1,8 Milliarden US-Dollar für Zahnpasta aus, ungefähr 715 Millionen für zahnpflegenden Kaugummi, annähernd 740 Millionen für Mundwasser und fast 950 Millionen für Zahnbürsten und Zahnseide. Obwohl viele dieser Produkte in erster Linie der Gesundheitspflege im Mund dienen, kaufen die Leute sie gewiss auch, um angenehm zu riechen. Und die 625 Millionen Dollar für Duftspender wie Minzbonbons oder Mundsprays dienen ausschließlich diesem Zweck.

Rund um die Uhr werden übel riechende Stoffe produziert

Inzwischen weiß man ziemlich gut über die Ursachen der meisten Halitosefälle Bescheid. Wie Isbor-Mitgründer Daniel van Steenberghe an der katholischen Universität Leuven (Belgien) und unsere Gruppe an der Universität Tel Aviv (Israel) herausfanden, entstehen die üblen Gerüche bei 85 bis 90 Prozent der Betroffenen im Mund. So wie anderer Geruch auch, der von feuchten Stellen des Körpers – wie den Achseln oder beschuhten Füßen – ausströmt, ist schlechter Atem in erster Linie das Ergebnis des mikrobiellen Stoffwechsels.

Die Mundhöhle beherbergt hunderte Bakterienarten, die unterschiedliche Nahrungsstoffe bevorzugen. Vor allem Proteine stehen auf ihrer Wunschliste, und unter den dabei anfallenden Abbauprodukten finden sich einige, die wirklich stinken. Rund um die Uhr können die Mundbakterien – meistens solche, die ohne Sauerstoff auskommen – Schwefelwasserstoff produzieren, der unverkennbar nach faulen Eiern riecht; Methylmercaptan und Skatol, die auch in Fäkalien vorkommen; Indol, das in geringen Mengen in Jasmin- und Orangenblütenöl zu finden ist, in höheren Konzentrationen aber abstoßend riecht; Cadaverin, welches in verwesenden Leichen auftritt; Putrescin, ansonsten in faulendem Fleisch anzutreffen; und schließlich Isovaleriansäure, die nach Schweißfüßen stinkt. Kein Wunder also, dass der menschliche Atem mitunter die Nase des Gegenübers beleidigt.

Walter J. Loesche von der University of Michigan, ein Ex-Präsident der Isbor, hat kürzlich herausgefunden, dass auf der Zunge andere – und bislang unbekannte – Mikroorganismen leben als im Zahnbelag. Gegenwärtig arbeitet Loesche an einem Katalog der Mikroorganismen von Menschen mit und ohne Halitose.

Bei Menschen mit gesunden Zähnen ist die Hauptquelle des schlechten Atems der Zungenrücken. Er wird nur selten vom Speichel gereinigt, und in seinen zahlreichen kleinen Fältchen können sich Bakterien gut ansiedeln. Sie leben von dem in den Rachenraum tropfenden Nasensekret, das bei einem Viertel der untersuchten Stadtbevölkerung auftritt, sowie von anderen Rückständen, die an der Zunge hängen bleiben.

Zu weiteren Ursachen gehören mangelnde Mundhygiene – vor allem, wenn proteinreiche Teilchen zwischen den Zähnen zurückbleiben –, entzündetes Zahnfleisch, unsaubere Zahnprothesen sowie Abszesse. Da ein ständiger Speichelfluss die Bakterien und ihre chemischen Produkte fortspült, kann alles, was ein Austrocknen des Zungenrückens fördert – Atmen durch den Mund, Fasten, langes Reden, Stress und vielerlei Medikamente – die Situation verschlimmern. Auch das Rauchen ist ein Feind frischen Atems. Obwohl der Rauch die bakterielle Aktivität hemmen kann, überwiegen seine negativen Aspekte: Der Rauch trocknet den Mund aus, verschlimmert Erkrankungen des Zahnfleischs und den Fluss von Nasensekret; und er hinterlässt Rückstände, deren Geruch sich mit dem schon vorhandenen Mundbouquet mischt.

Einige Fälle hängen anscheinend mit Parodontose, einer krankhaften Zerstörung des Zahnfleisches, zusammen und

IN KÜRZE

➤ Mundgeruch oder Halitose ist ein häufiges, vom Betroffenen meist unerkanntes medizinisches Problem, das sich sozial höchst nachteilig auswirkt. Außer echter Halitose kann gelegentlich auch die ständige Furcht, schlecht aus dem Mund zu riechen – die Halitophobie –, die Lebensqualität ernsthaft mindern.

➤ Seit kurzem analysieren Forscher die Halitose qualitativ und quantitativ. Sie entdeckten in der Mundhöhle zahlreiche Bakterienarten, die übel riechende Stoffwechselprodukte ausscheiden.

➤ Der Handel mit Mitteln für frischen Atem ist ein lukratives Geschäft. Für Mundwasser und Minzbonbons werden Unsummen ausgegeben – meist ohne dauerhafte Besserung.



liefern insofern dem Zahnarzt nützliche Hinweise. Die Verbindungen Schwefelwasserstoff und Methylmercaptan riechen nicht nur übel, sie sind auch noch giftig. Indem sie die Zellen des Zahnfleischs schädigen, könnten sie dessen Abbau vorantreiben. Außerdem produzieren, wie Israel Kleinberg von der Staatsuniversität von New York in Stony Brook herausfand, einige an Zahnfleischerkrankungen beteiligte Bakterienarten einen gewaltigen Gestank, wenn sie im Labor unter Ausschluss von Sauerstoff auf Aminosäuren gezüchtet werden. Die Anwesenheit einiger dieser Bakterien – *Treponema denticola, Porphyromonas gingivalis* und *Bacteroides forsythus* – im Zahn- oder Zungenbelag kann der Zahnarzt binnen Minuten mit dem von Loesche entwickelten Bana-Test (abgekürzt für Benzoyl-DL-Arginin-Naphthylamid) nachweisen. Die Bakterien produzieren ein Enzym, das Bana abbaut, wodurch eine farbige Verbindung entsteht. Wie kaum anders zu erwarten, besteht zwischen positiven Bana-Tests und Halitose ein statistischer Zusammenhang.


ILLUSTRATION: JOSEPH DANIEL FIEDLER

Mundbakterien, die Süßes lieben

Lange hatte man Mundbakterien, die sich vorzugsweise von Zuckern statt von Proteinen ernähren, von der Schuld am Mundgeruch freigesprochen. Doch wie Nir Sterer in meinem Labor entdeckte, liegen viele Proteine im Mund tatsächlich als so genannte Glykoproteine vor, bei denen Zuckerkomponenten an einen Proteinkern gebunden sind. Die auf Zucker spezialisierten Mikroorganismen können diese Komponenten von den Glykoproteinen abspalten; zurück bleiben nackte Proteine, die von den darauf begierigen Bakterien verdaut werden. Kürzlich hat Sterer mit einem einfachen Farbentest gezeigt, dass das Ausmaß der enzymatischen Zuckerabspaltung im Speichel mit der Stärke des Mundgeruchs korreliert ist. Demnach könnten Wissenschaftler den Mundgeruch bekämpfen, indem sie die anfängliche Zuckerabspaltung verhindern.

Warum nicht gleich alle Mikroorganismen auf der Zunge beseitigen, um mit der Halitose radikal Schluss zu machen? Diese Bakterien haben eine wichtige Schutzfunktion. Die Zunge beherbergt geringe Mengen des hefeähnlichen Pilzes *Candida*, dessen Population durch die Anwesenheit der Bakterien klein gehalten wird. Werden die Zungenbakterien durch Antibiotika ausgerottet, steht einer explosionsartigen Vermehrung von *Candida* nichts mehr im Wege. Solche Pilzerkrankungen sind viel unangenehmer und schwieriger zu bekämpfen als die Halitose. Darum gilt es, die Bakterien auf der Zunge zu dulden, ohne ihre Populationen ausufern zu lassen.

Neben dem Mund ist die Nase, inklusive ihrer Höhlen und Nebenhöhlen, die häufigste Quelle für Mundgeruch. In fünf bis zehn Prozent der Fälle entspringt der schlechte Atem diesem Organ und riecht auch anders als aus dem Mund. Wieder kann er dem Arzt bei der Diagnose des zu Grunde liegenden Problems helfen. Als Ursachen kommen chronische Entzündungen der Nebenhöhlen in Betracht sowie Erkrankungen, die den Schleimfluss hemmen oder blockieren. In einem kuriosen Fall führte uns der auffällige Atem einer 28-jährigen Frau zu einem Kügelchen, das sie sich wohl als kleines Kind in die Nase gesteckt hatte. In der Tat platzieren Kinder gern Objekte in ihren Nasenlöchern und verursachen damit manchmal einen unangenehm riechenden Ausfluss. Deshalb sollte man die Nasenlöcher auf Fremdkörper untersuchen, wenn ein Kind plötzlich einen seltsamen Geruch verströmt.

Literaturhinweise

Bad Breath: Research Perspectives.Von Mel Rosenberg (Hg.). Ramot Publishing, Tel Aviv University, 1997.

Clinical Assessment of Bad Breath: Current Concepts. Von Mel Rosenberg in: Journal of the American Dental Association, Bd. 127, S. 475 (1996).

Weblinks finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

Wenn der eigene Speichel nach Fisch riecht

An rund drei Prozent der Halitose-Fälle sind chronisch entzündete Mandeln schuld. Auch Hunderte anderer Krankheiten können Mundgeruch bewirken, doch insgesamt verursachen sie weniger als ein Prozent aller Fälle. Ein interessantes, wenn auch seltenes Beispiel ist das so genannte Fischgeruch-Syndrom. Die Betroffenen berichten, dass ihr Speichel und Schweiß manchmal für sie selbst nach Fisch riecht, obwohl andere davon praktisch nichts merken. Ein Arzt, der diese Erkrankung nicht kennt, mag sogar ein psychisches Problem vermuten. In Wirklichkeit resultiert das Fischgeruch-Syndrom – fachlich Trimethyl- ▶

Übertriebene Furcht vor Mundgeruch

Ruby – eine fiktive, aus mehreren realen Fällen zusammengesetzte Patientin – kleidet sich stets tadellos und wirkt besonders gepflegt. Als erfolgreiche Geschäftsfrau hat sie scheinbar alles unter Kontrolle – wenn da nicht dieses eine Problem wäre. Vor dreißig Jahren sagte ihr eine Schulfreundin, sie rieche schlecht aus dem Mund. Seitdem lebt Ruby in ständiger Furcht vor ihrem Atem. Zu Kunden hält sie stets Abstand und kaut unentwegt Kaugummi. Sie geht regelmäßig zum Zahnarzt, putzt mindestens viermal täglich die Zähne, reinigt die Zunge, benutzt Zahnseide und gurgelt mit antiseptischem Mundwasser. Sie vermeidet es, ihren Ehemann auf den Mund zu küssen, und achtet darauf, anderen Menschen nicht zu nahe zu kommen. Im Freien bemüht Ruby sich, bei Gesprächen gegen den Wind zu stehen. Der vermeintliche Mundgeruch ist ihr so peinlich, dass sie mit niemandem darüber spricht.

Schließlich kam Ruby in unsere Klinik. „Ich habe das Gefühl, ein erfolgreiches Leben zu führen – mit Ausnahme dieses fürchterlichen Problems“, erzählte sie uns unter Tränen. Als wir jedoch ihren Atem testeten, konnten wir beim besten Willen keinen Mundgeruch feststellen. Auch bei Rubys späteren Terminen war kein übler Geruch wahrzunehmen: Ihr Atem war einfach unauffällig.

Ruby leidet wie Millionen andere an Halitophobie, der krankhaften Angst, schlecht aus dem Mund zu riechen. Der Experte für Sozialphobien Murray B. Stein von der Universität von Kalifornien in San Diego hat im Jahr 1997 in einer Studie im kanadischen Alberta herausgefunden, dass von 1206 Teilnehmern 15,8 Prozent „sehr besorgt“ wegen ihres Atems waren. 2,8 Prozent hatten deshalb schon einen Experten aufgesucht, und 2,7 Prozent gaben an, ihre Sorge wirke sich einigermaßen oder stark auf ihr Leben aus. Ein Prozent der Teilnehmer räumte ein, aus Angst wegen ihres Mundgeruchs nicht zu einer Party gegangen zu sein. Offensichtlich schränkt Halitophobie die sozialen Aktivitäten ein und führt in einen Zustand selbstauferlegter Einsamkeit.

Zu den Betroffenen, die ich befragt habe, zählen Anwälte, Lehrer, Richter, Schauspieler, ein Arzt, ein hochrangiger Politiker und sogar jemand, der Zahnarzt wurde, weil er hoffte, dadurch eine Lösung für sein „Problem“ zu finden.

Halitophobiker verbergen ihre Sorge. Ein Kollege versuchte mir einmal einzureden, eigentlich gebe es gar keine Halitophobie. „Was redest du da“, platzte seine langjährige Ehefrau heraus: „Ich selbst bin so ein Fall!“

Halitophobiker glauben, für ihre Furcht gute Gründe zu haben. So halten sie zum Beispiel einen unangenehmen Geschmack im Mund für ein Anzeichen von Mundgeruch, obwohl Geschmack und Atem nichts miteinander zu tun haben müssen. Manche meinen, sie hätten den üblen Geruch eines Familienmitglieds geerbt. Und einige interpretieren das Verhalten anderer Menschen – wenn diese beispielsweise zufällig ein Fenster öffnen oder sich die Nase reiben – als Reaktion auf ihren Mundgeruch.

Nur wenige Halitophobiker sind bereit, einen psychologischen Grund für ihre Furcht in Betracht zu ziehen; doch erst damit steigt die Erfolgschance einer Psychotherapie. Tatsächlich haben wir zusammen mit Ilana Eli von der Universität Tel Aviv festgestellt, dass Halitophobiker im Umgang mit anderen Menschen zu Überempfindlichkeit und Zwanghaftigkeit neigen. In den meisten Fällen halten sie leider daran fest, eine Lösung für ein Problem zu suchen, das gar nicht existiert.



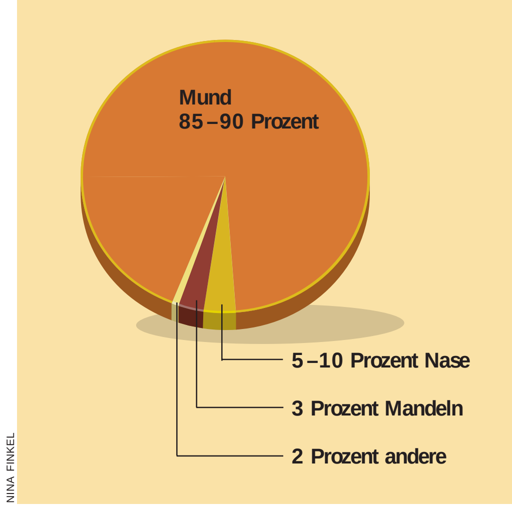
ILLUSTRATION: JOSEPH DANIEL FIEDLER

aminurie – aus dem erblichen Mangel eines Enzyms, das normalerweise die nach Fisch riechende Substanz Trimethylamin abbaut.

Viele Menschen glauben – mitunter durch einschlägige Werbung bestärkt –, schlechter Atem komme nicht aus dem Mund, sondern aus dem Magen. Doch ein ständiger Strom von Gasen oder übel riechender Substanz aus dem Magen durch die Speiseröhre ist sehr selten und weist – anders als einfaches Aufstoßen – auf eine Krankheit hin, zum Beispiel auf eine Fistel zwischen Magen und Darm oder einen abnormen Rückstrom von Mageninhalt in die Speiseröhre. Selbst der scharfe Geruch nach dem Genuss von Knoblauch entspringt hauptsächlich der Mundhöhle.

Nach wie vor ein hartnäckiges Rätsel ist die Frage, warum Menschen so überaus empfindlich gegenüber dem Mundgeruch anderer sind, während sie eigenen schlechten Atem kaum bemerken. Eine der früheren Theorien, nach der wir uns irgendwie an den eigenen Gestank gewöhnen, ist offenbar falsch. Untersuchungen, die Ilana Eli und Ronit Bar-Ness Greenstein in unserem Labor durchgeführt haben, zeigen nämlich, dass Menschen durchaus in der Lage sind, ihren eigenen Atem objektiv zu bewerten, sobald man eine Probe der Geruchsquelle – beispielsweise winzige mit einem Zahnstocher zwischen den Zähnen hervorgeholte Speisereste – aus der Mundhöhle entnimmt und sie der Testperson vor die Nase hält.

Quellen schlechten Atems



Mundgeruch entsteht tatsächlich größtenteils im Mund. Äußerst selten ist die Ursache jenseits der Mandeln zu finden. Nur in Ausnahmefällen ist – entgegen einer weit verbreiteten Meinung – der Magen eine Quelle für Mundgeruch.

Relativ häufig geht hingegen der üble Atem von der eigenen Nase aus, inklusive ihrer diversen Höhlen und Nebenhöhlen. Manchmal sind Fremdkörper die Ursache; wenn ein Kind plötzlich seltsam riecht, sollte man die Nasenlöcher daraufhin untersuchen.

Milliarden Euro für angenehm frischen Atem

Des Rätsels Lösung mag sein, dass wir die Luft horizontal aus unserem Mund blasen und erst danach einen vertikalen Luftstrom durch die Nase einatmen; damit ist die Chance, sozusagen in unseren Mund hineinzuriechen, eher gering. Was auch immer der Grund sein mag: Vom eigenen schlechten Atem erfährt der Betroffene meist nur, wenn es ihm jemand sagt – und das kommt, weil es peinlich ist, selten vor. Ironischerweise dürften die Milliarden Euro, die jedes Jahr für frischen Atem ausgegeben werden, zum großen Teil aus den Geldbeuteln von Menschen stammen, die sich bloß einbilden, schlecht zu riechen. Eine extreme Form dieses weit verbreiteten Irrglaubens ist die Halitophobie – die zwanghafte Überzeugung, man habe einen schlechten Atem (siehe dazu den Kasten links).

Obwohl flüchtige Schwefelverbindungen keinesfalls die einzige Ursache sind, wurden diese Produkte des bakteriellen Stoffwechsels die ersten Ziele einer objektiven Diagnose. In den achtziger Jahren stellte unsere Arbeitsgruppe zusammen mit Jacob H. Gabbay vom israelischen Umweltministerium und Christopher A. G. McCulloch von der Universität Toronto fest, dass die Sulfide, die zu schlechtem Atem beitragen, mit einem tragbaren „Halimeter“ nachgewiesen werden können. Seitdem hat der Hersteller, Manny Shaw von Interscan in Chatsworth (Kalifornien), seinen Apparat an tausende Zahnärzte und Forscher verkauft. Der spanische Chemiker Alfredo Sanz-Medel von der Universität Oviedo entwickelte 1999 eine andere Methode, bei der die Sulfidkonzentration indirekt durch die Fluoreszenz gemessen wird, die bei der Reaktion der Sulfide mit einer Quecksilberverbindung auftritt.

Eines Tages könnten solche Techniken zur Entwicklung eines handlichen Sulfid-Messgeräts führen. Die Resultate der vorhandenen Halimeter stimmen statistisch mit den Daten komplizierterer chromatografischer Analysen überein sowie mit den Urteilen menschlicher Testschnüffler, die den Mundgeruch von Studienteilnehmern zu Forschungszwecken bewerten.

Ist eine Halitose einmal nachgewiesen, möchte sich der Betroffene natürlich davon befreien. Schon einfache Mundhygiene – Zähneputzen und Reinigung mit Zahnseide – wirkt vorbeugend. Das gegen Zahnfleischentzündungen eingesetzte antimikrobielle Mittel Chlorhexidin bekämpft zwar auch erfolgreich Halitose, kann aber leider die Zähne entfärben, den Geschmackssinn beeinträchtigen und Geschwüre im Mund verursachen. Obwohl diese Effekte alle reversibel sind, sollte Chlorhexidin daher nicht länger als ein paar Tage benutzt werden. ▶

Die Steine aus den Mandelmulden


RELLU SAMUEL, UNIVERSITÄT TEL AVIV

In den Mulden der Mandeln bilden sich Steinchen, so genannte Tonsillolithen, aus teilweise verkalkten Bakterien und allerlei Rückständen. Die Tonsillolithen selbst riechen faulig, verursachen aber nicht unbedingt Mundgeruch. Sie sind relativ selten: Wohl nur zwei bis drei Prozent der Bevölkerung tragen diese Steinchen mit sich herum. Da sie normalerweise keine medizinischen Probleme verursachen, haben viele Mediziner und Zahnärzte noch nie von ihnen gehört. Die abgebildeten Proben stammen von einem einzigen Menschen.

Tipps für frischen Atem

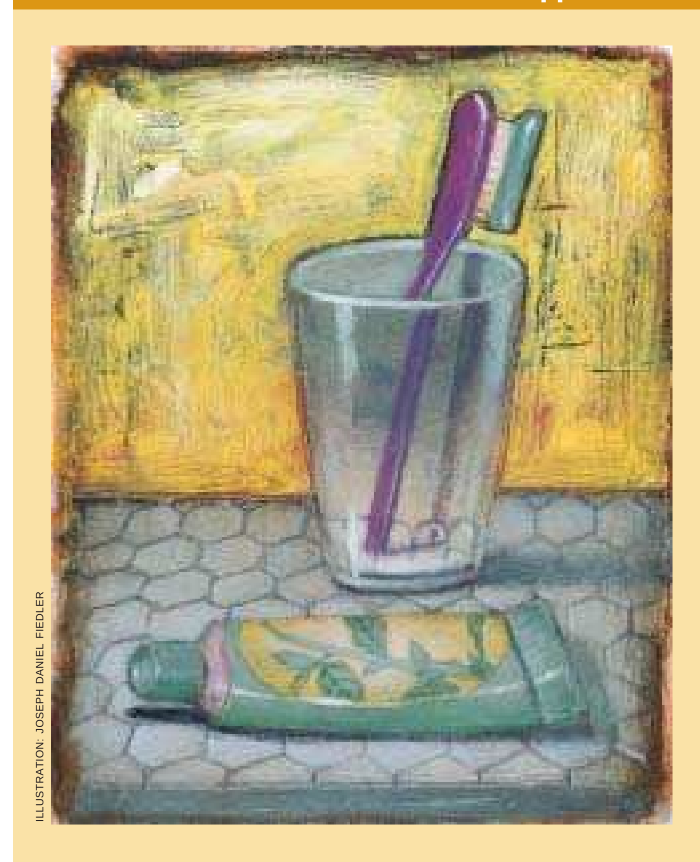


ILLUSTRATION: JOSEPH DANIEL FIEDLER

- Reinigen Sie den hinteren Zungenrücken sanft mit einem Zungenreiniger aus Kunststoff. Achten Sie darauf, die Zunge dabei nicht zu verletzen, wischen Sie nur die Schleimschicht ab. Der Würgereiz verschwindet durch Gewöhnung.
- Frühstücken Sie ausgiebig. Ein gutes Frühstück reinigt den Mund und regt den Speichelfluss an.
- Achten Sie darauf, dass Ihr Mund nicht austrocknet. Das Kauen eines Kaugummis für wenige Minuten kann Mundgeruch mindern. Trinken Sie ausreichend.
- Benutzen Sie ein Mundwasser – am besten kurz vor dem Zubettgehen. Das verhindert das Wachstum von Mikroorganismen und das Entstehen von Mundgeruch über Nacht.
- Reinigen Sie den Mund, nachdem Sie stark riechende Mahlzeiten mit Knoblauch, Zwiebeln, Curry oder ein Getränk wie Kaffee zu sich genommen haben. Vergessen Sie dabei nicht die Zahnzwischenräume, besonders nach proteinreicher Kost.
- Reinigen Sie Ihre Zähne und Zahnzwischenräume nach Anleitung Ihres Zahnarztes.
- Fragen Sie ein erwachsenes Familienmitglied oder einen guten Freund, wie Ihr Atem riecht. Das ist die verlässlichste – und billigste – Methode, um herauszufinden, ob Sie Halitose haben.

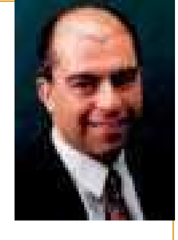
Andere Mittel sind Jahrtausende alt. Das Reinigen der Zunge gehört im Fernen Osten seit jeher zur Mundhygiene und gewinnt auch im Westen an Popularität. Schon der babylonische Talmud erwähnt Mastix, der möglicherweise mit dem wohlriechenden Harz Ladanum aus dem Buch Genesis identisch ist. Beim Mastix handelt es sich um das Harz des Strauches *Pistacia lentiscus*, der zu diesem Zweck noch immer auf der Mittelmeerinsel Chios kultiviert wird, obwohl moderne synthetische Kaugummis den Mastix inzwischen weitgehend verdrängt haben. Interessanterweise wurde das Harz einst häufig zur Wundbehandlung eingesetzt und wirkt, wie man heute weiß, stark antibakteriell. Mastixkauen steigert somit nicht nur den Speichelfluss, sondern tötet vermutlich auch Mikroorganismen ab, die üblen Geruch verbreiten.

In aller Welt werden wohlriechende und teilweise antibakterielle Naturprodukte gekaut: Guave-Schalen in Thailand, Anis-Samen im Fernen Osten, Petersilie in Italien, Gewürznelken in Irak und Zimt in Brasilien. Viele Mundwässer enthalten Duftöle wie Menthol, Eukalyptol und Salicylsäuremethylester (Gaultheriaöl). Die meisten Mittel für guten Atem wirken allerdings nur kurze Zeit, etwa zwanzig Minuten bis zwei Stunden lang. Zum Beispiel gilt Minze allgemein als besonders guter Inhaltsstoff, aber in Wahrheit ist die Wirkung relativ schwach und hält – verglichen mit anderen Ölen – nur kurz vor.

Elektronische Nasen messen den individuellen Mundgeruch

In den vergangenen 15 Jahren hatte ich Gelegenheit, in Kliniken und Labors zu Forschungszwecken an tausenden Mündern zu schnuppern, ganz zu schweigen von den Gerüchen, die mir in Supermärkten, Flugzeugen und während des Fasttages Jom Kippur in der Synagoge begegneten. So wie Camembert ganz anders duftet als Edamer, verströmt der Atem ein individuelles Geruchsgemisch, dessen Zusammensetzung von den jeweils beteiligten Mikroorganismen, ihrer Herkunft und ihren Aktivitäten abhängt. Während die Forscher sich noch darüber streiten, wie schlechter Atem quantitativ zu bestimmen sei, könnten künftige elektronische Nasen nicht nur objektive Halitosewerte liefern, sondern auch Geruchstypen unterscheiden und auf diesem Weg Hinweise auf deren Ursprung geben.

Noch wissen wir längst nicht genug. Zum Beispiel müssen wir die verschiedenen Bakterienarten erst einmal den entsprechenden Gerüchen zuordnen. Wie Nase und Mandeln im Einzelnen zur Halitose beitragen, ist kaum bekannt. Und nur wenige Psychologen erforschen die Halitophobie. So unbedeutend Diagnose und Therapie der Halitose im Pantheon der medizinischen Probleme zunächst erscheinen mögen – auf das soziale Leben der betroffenen Menschen kann das unerkannte Leiden einen verheerenden Einfluss ausüben. ■



Mel Rosenberg *wuchs in Kanada auf und lebt seit 1969 in Israel. Er ist Professor für Mikrobiologie der Zahnmedizin an der Universität Tel Aviv. Für seine Forschungen hat er mehrere Preise sowie akademische Ehrungen in den USA, Großbritannien und Kanada erhalten. 1996 gründete er die Firma InnoScent mit, die Produkte gegen Körpergeruch entwickelt. Unter anderem hat er ein Kinderbuch über Bakterien veröffentlicht.*

1952

Ein „Baby-Uranbrenner“ für private Atomforschung

Bisher liegt die Atomforschung mit Uranbrennern ausschließlich in Händen von Forschungsstellen, die von den Regierungen einiger Länder unterhalten werden. … Aber der Wunsch, über einen eigenen Uranbrenner zu verfügen, ist besonders bei der amerikanischen Industrie in den letzten Jahren immer größer geworden. So hat die North American Aviation, Inc. … im Auftrag der US Atomic Energy Commission einen Kernreaktor besonders kleinen Ausmaßes entworfen. Die Entwicklung und Prüfung der Einzelteile der Anlage soll bis zum Juli dieses Jahres abgeschlossen sein, und man hofft, daß die ersten „Baby-Uranbrenner“ im Jahre 1954 bei verschiedenen größeren Firmen in Betrieb sein werden. … Die Möglichkeit, radioaktive Isotope an Ort und Stelle zu gewinnen, läßt dann auch Experimente mit kurzlebigen Isotopen zu. … Da die Gewinnung radioaktiver Isotope nur einen kleinen Bruchteil der Kapazität des Brenners beansprucht, steht praktisch die ganze Leistung (160 kW) für alle anderen Experimente zur Verfügung. *(Die Umschau, 52. Jg., Heft 12, S. 370, 1952)*





Modell eines „Baby-Uranbrenners“

Technetium auf Sternen

Technetium, das erste „künstliche“ Element, wurde 1937 von Perrier und Segrè in einem Stück Molybdän nachgewiesen, das sie mit Neutronen des Zyklotrons in Berkeley bombardiert hatten. Ebenso wurde Technetium unter den Spaltprodukten schwerer Atome aufgefunden. Kein vollständig stabiles Isotop ist bekannt; ein nahezu stabiles Isotop hat eine Halbwertszeit von weniger als eine Million Jahren. … Neue Spektrogramme von S-Sternen, insbesondere von Veränderlichen mit langer Periode, zeigen einige Linien neutralen Technetiums. … Das Vorkommen eines instabilen Elements auf Sternen ist überraschend. Entweder gibt es ein stabiles Isotop, das bis jetzt auf der Erde noch nicht entdeckt worden ist; oder S-Sterne produzieren im Laufe ihrer Entwicklung Technetium. *(Physikalische Blätter, 8. Jg., Heft 6, S.278, 1952)*

Erfolgreiche Herzüberpflanzung

Eine Gruppe Chicagoer Herzspezialisten berichtete … über erfolgreiche, an lebenden Hunden vorgenommene Herzüberpflanzungen. Bei der Überpflanzungsoperation wurden jeweils drei Hunde verwendet: Während die Transplantation zwischen zwei unmittelbar beteiligten Tieren durchgeführt wurde, versorgte das Kreislaufsystem des dritten Tieres die Herzen mit Blut. In 10 von 22 Fällen gelang die Transplantation, und die Ärzte vermochten die übertragenen Herzen zwei Tage hindurch funktionsfähig zu halten. *(Orion, 7. Jg., Nr. 12, S. 503,1952)*

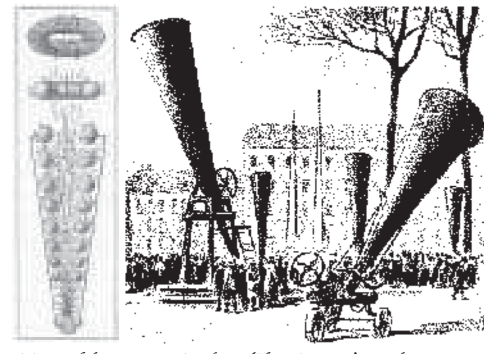


Eine Kamera, die fertige Bilder herstellt

Ein solcher Apparat ist von der Chemischen Fabrik konstruiert worden. … Er enthält, abgeschlossen vom Tageslicht, einerseits den Aufnahmeapparat, andererseits Behälter für je eine Negativ- und Positivspule, ein System von Bädern und eine Vorrichtung zum Kopieren oder Belichten des Positivstreifens. Dies ist derartig angeordnet, dass der Negativstreifen successive durch den Aufnahmeapparat, die Entwickelungsbäder, die Kopiervorrichtung … und der Positivstreifen schließlich durch die Entwicklungs- und Fixierbäder aus dem Apparate heraus ans Tageslicht geführt werden können. *(Die Umschau, 2. Jg., Nr. 26, S. 518, 1902)*

Kanonen gegen Gewitter und Hagelschläge

Der Bürgermeister in Windisch-Füstritz will gefunden haben, daß durch Böllerschüsse herankommende Gewitter vertrieben werden könnten. … Die Böller, deren man sich bedient, sind vorne mit einer großen trichterförmigen Verlängerung aus Blech versehen, die den Zweck hat, die Luftwellen möglichst in der Richtung auf die Wolken zu zusammenzuhalten. … Die Wissenschaft hat die „Erfolge“ der „Wetterschießer“ bezweifelt. Wenn überhaupt das Schießen mit Kanonen auf die Hagelvertreibung einen Einfluß hat, dann muß sich dies auf den großen Artillerie-Schießplätzen deutlich kundgeben. Daher hat das preußische meteorologische Institut in Berlin auf zwölf Schießplätzen genaue Aufzeichnungen über Gewitter und Hagel während dreier Jahre veranstaltet … Von einem Einfluß des Schießens selbst mit den schwersten Geschützen auf eine Verminderung der Hagelfälle ist nichts zu erkennen! Damit sind die Behauptungen der „Wetterschießer“ widerlegt und ihre Wetterkanonen sind nur Kuriositäten. *(Das Universum, 23. Jg., S. 373–375, 1902)*



Die Luftbewegung in der Nähe einer Wetterkanone beim Entweichen der Pulvergase

Merkwürdige Experimente mit X-Strahlen

Bei dem Versuche von F. Dreuschuch, ein zwischen einer Thür und einer Röntgenlampe aufgestelltes menschliches Skelett durch die Thür im Nebenzimmer am Baryum-Platincyanürschirm zu zeigen, ergab sich, daß das Skelett gleich beim ersten Aufblitzen der Lampe direct auf der Thür sichtbar wurde, wenn auch nicht so glänzend, wie auf dem davorgehaltenen Schirm. Es ließ sich nun nachweisen, daß einzig und allein die Zinkfarbe, mit der die Thür gestrichen war, die Fluorescenz verursachte; denn unbestrichene Bretter ließen keine Fluorescenz wahrnehmen. Dagegen zeigte sie sich deutlich, sobald die Bretter mit Zinkfarbe bestrichen wurden. *(Der Stein der Weisen, 28. Bd., S. 209, 1902)*

Die Radarkontrolle

Auf Deutschlands Straßen fahren einer Umfrage zufolge achtzig Prozent der Verkehrsteilnehmer schneller, als es erlaubt ist. Das ist angesichts der möglichen Folgen eine traurige Bilanz: Lärmbelästigung und Sachschäden bei Verkehrsunfällen sind die harmlosesten – etwa die Hälfte aller Verkehrstoten geht zu Lasten von Rasern, das waren im vergangenen Jahr etwa 3500 Menschen. Sicherheitssysteme wie Airbag und ABS haben zwar die Zahl der Verkehrstoten insgesamt sinken lassen, verleiten aber wohl zu Raserei – die Zahl der Unfälle mit Sachschäden stieg. Immer häufiger werden deshalb bei der Verkehrsüberwachung modernste Radar- und Lasergeräte zur Geschwindigkeitskontrolle eingesetzt.

Beide senden aktiv Signale aus, die vom Fahrzeug reflektiert und dann wieder empfangen werden. Veränderungen erlauben Rückschlüsse auf die fragliche Geschwindigkeit. Radargeräte, die ein enges Bündel von Mikrowellen aussenden, sind entweder am Straßenrand fest montiert, messen überholende Fahrzeuge aus dem Heckfenster einer im Verkehrsfluss mitfahrenden Polizeistreife oder werden als Radarpistolen in der Hand gehalten. Die ersten, Anfang der 1950er Jahre verwendeten Systeme emittierten noch 9,4-Gigahertz-Wellen. Heutige arbeiten mit Frequenzen von 13,4 bis 34,36 Gigahertz – der Abtaststrahl ist dann schmaler und das Anpeilen mit Radarpistolen fällt somit leichter. Eine einwandfreie Geschwindigkeitsmessung verlangt trotz aller technischer Fortschritte außer der Eichung eine korrekte Handhabung des Geräts. Messfehler sind möglich, insbesondere dann, wenn der Radarstrahl vom Fahrzeug nicht direkt zurückgeworfen, sondern mehrfach reflektiert wird. Würde er beispielsweise zunächst eine Mauer treffen, danach noch einmal das fragliche Automobil und erst dann den Empfänger, ergäbe die Messung eine doppelt so hohe Geschwindigkeit.

Seit den 1990er Jahren kommen auch Lasergeräte bei der Geschwindigkeitsmessung zum Einsatz. Weil ein Lichtstrahl weniger streut als Radarwellen, kann er einzelne Fahrzeuge bei hoher Verkehrsdichte sicherer selektieren. Gravierende Messfehler entstehen aber, wenn die Impulse auf einen parallel zur Fahrbahn ausgerichteten Teil des Objekts wie Längsseite oder Motorhaube treffen und die Laserpistole zudem leicht bewegt wird. Trifft nämlich der zweite Laserimpuls weiter hinten auf das Auto als der erste, misst das Gerät nicht nur die tatsächlich vom Fahrer zurückgelegte Strecke, sondern zusätzlich die Distanz zwischen den beiden Auftreffpunkten – eine zu hohe Geschwindigkeitsangabe ist die Folge. Die Polizei ist deshalb angehalten, nur auf quer zur Fahrtrichtung stehende Teile (Nummernschild) zu zielen.

*Von **Mark Fischetti**, Scientific American, und **Daniel Bächtold**, freier Wissenschaftsjournalist*

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

Ein Radargerät (im Bild eine schematisierte Radarpistole) sendet ein Mikrowellensignal fester Frequenz. Die von einem sich nähernden Objekt reflektierten Wellen werden nach dem Doppler-Prinzip verdichtet. Das empfangene Signal hat deshalb eine höhere Frequenz als das ausgesandte und zwar um so deutlicher, je schneller das reflektierende Fahrzeug fuhr. Bei sich entfernenden Fahrzeugen verringert sich entsprechend die Frequenz.



Eine so genannte Gunn-Diode erzeugt und emittiert Mikrowellen, die eine Antenne zum „Radarstrahl“ fokussiert. Letztere empfängt auch die reflektierten Signale. Eine spezielle Mixerdiode „vergleicht“ die emittierten und reflektierten Wellen und übergibt ein Differenzsignal einem Analog-Digital-Wandler, der es in binäre Daten umsetzt. Die verarbeitet ein spezieller Chip (*digital signal processor*, DSP) und gibt eine Geschwindigkeitsangabe auf einem kleinen Bildschirm aus.

GRAFIKEN: BRYAN CHRISTIE, QUELLE: DECATUR ELECTRONICS (RADAR), LASERCRAFT AND KUSTOM SIGNALS (LASER)



Je größer der Winkel zwischen Radargerät und dem zu vermessenden Fahrzeug ist, desto geringer schätzt es die Geschwindigkeit. Die Streifenwagen stehen deshalb stets möglichst nahe am Straßenrand. Geschwindigkeitsmessungen aus fahrenden Streifenwagen sind ebenfalls möglich: Von seinen Rädern angetriebene Impulsgeber übermitteln die Eigengeschwindigkeit an das „Moving-Radar“, das diese Messung mit der relativen Geschwindigkeit des angepeilten Objekts verrechnet.

Laserpistolen feuern kurze Lichtimpulse im Abstand von wenigen Millisekunden ab, die vom fraglichen Fahrzeug reflektiert werden. Aus den unterschiedlichen Laufzeiten berechnet das Gerät dessen Geschwindigkeit. Theoretisch würden zwei Impulse für eine Messung genügen; beide müssten aber auf die gleiche Stelle treffen. In der Praxis werden deshalb die Laufzeiten mehrerer Laserimpulse berücksichtigt. Weichen die einzelnen Messungen zu stark voneinander ab, muss das betreffende Auto nochmals angepeilt werden.

Wussten Sie schon ... ?

➤ Messfehler sollen sich nicht zu Lasten der Autofahrer auswirken: Drei Kilometer pro Stunde werden bei einer gemessenen Geschwindigkeit bis zu 100 Kilometer pro Stunde automatisch abgezogen. Liegt der Wert darüber, werden drei Prozent vom Messwert erlassen.

➤ Überhöhte Geschwindigkeit wird in der BRD normalerweise als Ordnungswidrigkeit geahndet und mit einer Geldbuße zwischen 10 und 425 Euro bestraft. Überschreitet die Geschwindigkeit das jeweilige Limit um 31 Kilometer pro Stunde, droht zusätzlich ein Fahrverbot von maximal drei Monaten.

➤ Radarwarngeräte erkennen den Messstrahl einer Geschwindigkeitskontrolle. Seit dem neuen Telekommunikationsgesetz von 1996 ist der Betrieb zwar nicht mehr strafbar, in den meisten Bundesländern gelten sie aber als „Störung der polizeilichen Arbeit“ und können ersatzlos konfisziert werden.

➤ Nach Möglichkeit werden die Geräte mit einer Foto- oder Videokamera gekoppelt (ansonsten muss eine Polizeistreife den zu schnell Fahrenden sofort stellen). Falls die Bildqualität eine eindeutige Identifizierung nicht ermöglicht, dürfen die ermittelnden Beamten Nachbarn oder Arbeitskollegen ein Foto des verdächtigten Fahrzeughalters vorlegen.

Der Weltcomputer

PCs aller Länder, vereinigt euch! Schon in wenigen Jahren könnte diese Vision Realität werden – zum Wohle der Benutzer und auf völlig kapitalistische Weise.

Von David P. Anderson und John Kubiatowicz

Wenn Anke von der Arbeit heimkommt und sich an ihren PC setzt, um ihre E-Mail zu lesen, ist dieser schon den ganzen Tag fleißig zugange. Im Auftrag einer Biotechnologie-Firma gleicht er eine DNA-Sequenz mit einer großen Menge von Proteinen aus einer Datenbank ab. Über seinen DSL-Telefonanschluss lädt er die Daten eines Radioteleskops zur späteren Analyse herunter. Seine Festplatte enthält außer Ankes eigenem Material verschlüsselte Teilstücke von tausenden anderen Dateien. Von Zeit zu Zeit wird eines dieser Fragmente gelesen und übertragen – es ist Teil eines Filmes, den sich gerade jemand in Helsinki ansieht. Sowie Anke jedoch ihre Maus bewegt, werden alle diese hektischen Aktivitäten unterbrochen, und der Computer und seine Netzwerkverbindungen stehen ausschließlich zu ihren Diensten.

Diese gemeinschaftliche Nutzung von Produktionsmitteln spielt sich nicht nur auf ihrem PC ab. Der tragbare Computer in ihrer Aktentasche ist zwar abgeschaltet, seine Festplatte jedoch dient als Teil eines weit verstreuten Lagers für Sicherheitskopien; Dateien irgendwelcher anderen Nutzer sind dort für den Notfall hinterlegt. Entsprechend liegen Kopien von Ankes wichtigsten Dateien auf Dutzenden von Festplatten in aller Welt.

Später sieht sich Anke auf ihrem ans Internet angeschlossenen digitalen Fernseher gegen Gebühr einen Spielfilm an. Die Bilddaten dafür werden während der Laufzeit aus Hunderten kleiner Teildateien zusammengesetzt, die auf Computern wie dem ihrigen lagern.

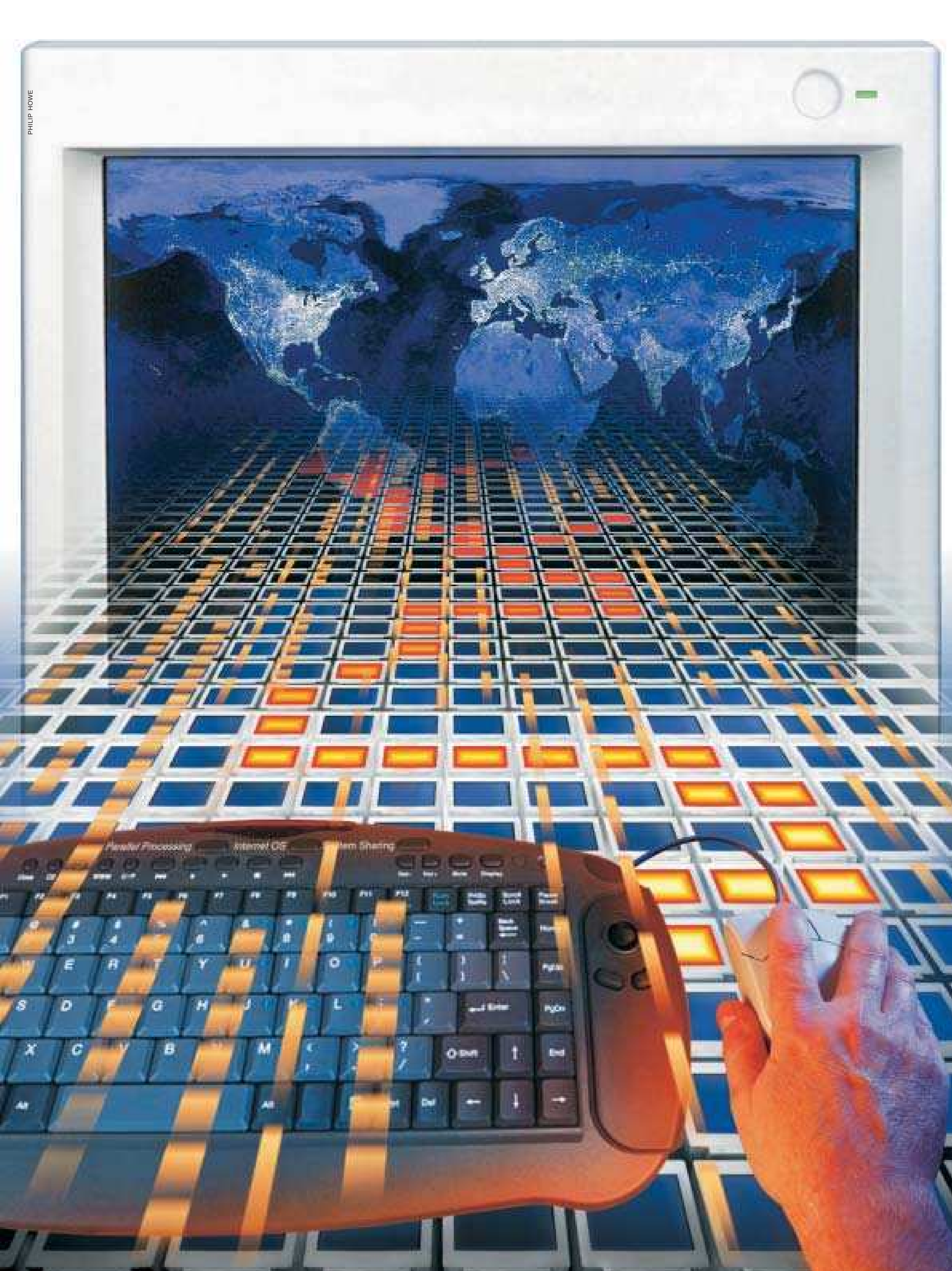
Ankes Computer arbeiten in ihrer freien Zeit für andere Nutzer – aber keineswegs umsonst. Mit jeder Minute Rechenzeit tröpfeln ein paar Cent Mieteinnahmen auf ihr virtuelles Bankkonto. Das Geld stammt von der Biotechnologie-Firma, dem Spielfilmverleih und dem Datensicherungsdienst. Statt sich ganze Hallen voller Server zuzulegen, mieten die Unternehmen Speicherplatz und Rechenzeit – nicht nur von Ankes Computer, sondern auch von Millionen anderen. Alle Beteiligten ziehen Nutzen aus diesem Geschäft: Die Unternehmen sparen das Geld für Hardware, wodurch es sich etwa der Spielfilmverleih leisten kann, wenig gefragte Kulturfilme anzubieten. Anke ihrerseits verdient sich etwas Geld hinzu, von ihren Dateien werden Sicherheitskopien angefertigt, und sie kann einen ausgefallenen Film genießen. Und für all das braucht es nichts weiter als ein Stück Software, das die Rechen- und Speicherkapazitäten von Millionen von Computern koordiniert: ein internetweites Betriebssystem (*internet-spanning operating system*, ISOS).

Noch ist Ankes Geschichte eine Fiktion, und ein ISOS gibt es bisher nicht – aber Vorläufer. Entwickler haben bereits zahlreiche Anwendungsprogramme geschrieben, die das riesige Potenzial unterbeschäftigter Computer im Internet nutzen sollen. Es geht um den Austausch von Rechenzeit und Speicherplatz unter Gleichrangigen (*peer to peer*). Auf diese Weise werden Probleme gelöst, deren Bewältigung mit eigens hierfür eingesetzten Computern zu mühsam, zu teuer oder überhaupt unmöglich wäre. Die Systeme von heute sind aber nur der erste Schritt. Weitere, sehr nützliche Anwendungen kommen einem sofort in den Sinn: ein Archiv, das zuverlässig hundert Jahre lang arbeitet, oder eine Suchmaschine für das semantische Web von morgen (Spektrum der Wissenschaft 8/2001, S. 42).


GETTY IMAGES

Leider ist die Entwicklung von Programmen, die überall im Internet laufen sollen, immer noch ungeheuer aufwendig. Jedes einzelne Programm ist von Grund auf neu zu konzipieren, und eine Menge Energie geht in technische Einzelheiten, die nur wenig mit dem eigentlichen Zweck des Programmes zu tun haben, wie etwa die Führung einer Nutzerdatenbank. Sollen internetweite Anwendungen alltäglich werden, dann müssen diese Infrastrukturfragen ein für alle Mal geregelt werden.

Wie kann das funktionieren? Nehmen wir uns Betriebssysteme wie Unix und MS-Windows zum Vorbild. Ein Betriebssystem stellt einem Programm einen genormten virtuellen Arbeitsplatz zur Verfügung. Das Programm darf so tun, als hätte es den exklusiven Zugriff auf alle Systemkomponenten. Damit nimmt das Betriebssystem dem Programm – beziehungsweise dem Programmierer – die Sorge um die unangenehmen Kleinigkeiten ab: Speicher- und Festplattenorganisation, Kommunikationsprotokolle, die Auseinandersetzung mit konkurrierenden Anforderungen und die Ansteuerung von Peripheriegeräten.



PHILIP HOWE

Zur Entwicklung von Programmen, die über die Grenzen eines Computers hinaus auf dem ganzen Netz laufen, würde ein internetweites Betriebssystem eine ähnlich genormte Umgebung schaffen.

Ein ISOS besteht aus einem Stück Software (einem „ISOS-Agenten“), das auf jedem lokalen Computer (zum Beispiel Ankes) läuft, und einem zentralen Koordinationssystem auf einem oder mehreren Serverkomplexen. Es soll nicht mehr sein als eine dünne Grenzschicht zwischen dem einzelnen Computer und der großen weiten Welt, welche die Signale des einen Bereichs in Anweisungen übersetzt, die der andere versteht, und beide Bereiche voreinander schützt. Im Einzelnen soll dieser so genannte Mikrokern nur sehr elementare Aufgaben übernehmen wie die Zuweisung von Rechenzeit und Speicherplatz für bestimmte Aufgaben, die Kommunikation zwischen den einzelnen Computern und die Leistungsabrechnung; dies alles nach Methoden, die der Ökonomie entlehnt sind. Dagegen würden nutzernahe Aufgaben von Dienstprogrammen erledigt, die sich des Betriebssystems bedienen, aber nicht Teil von ihm sind. Anke würde zum Beispiel ihre Dateien nicht direkt mit dem ISOS im Internet speichern, sondern dazu ein Sicherungsprogramm verwenden, das seinerseits ISOS-Funktionen aufruft.

Ein ISOS könnte hauptsächlich zwei Typen von Anwendungen unterstützen (Kasten Seite 86). Der erste besteht aus verteilter Datenverarbeitung, zum Beispiel für physikalische Simulationen, die Analyse von Radiosignalen, genetische Analysen, Computergrafik und die Modellierung von Finanzmärkten. Der zweite umfasst netzweite Online-Dienstleistungen wie Dateispeichersysteme, Datenbanken, die Bereitstellung von Websites, Online-Videos und ähnliche Angebote sowie fortgeschrittene Suchmaschinen fürs Web.

Was mein ist, ist auch dein

Heutzutage ist eine Einzelperson oder Organisation, die einen Computer nutzt, in der Regel auch dessen Besitzer. Mit einem ISOS dagegen würde es zuneh-

Bereits laufende Projekte

Verteilte Nutzung von Computern: große Projekte in kleinen Portionen

Rechnen

GIMPS (Great Internet Mersenne Prime Search)
www.mersenne.org/
Sucht nach großen Primzahlen (Spektrum der Wissenschaft 2/2002, S. 111). Etwa 130 000 Mitglieder sind eingetragen, und fünf neue Primzahlen wurden gefunden, darunter die größte bekannte Primzahl mit 4 Millionen Ziffern.

distributed.net www.distributed.net/
Entzifferte eine Reihe von verschlüsselten Nachrichten, indem es systematisch alle möglichen Schlüssel ausprobierte. Im gegenwärtigen Projekt werden mehr als 100 Milliarden Schlüssel pro Sekunde getestet. Darüber hinaus wird nach Golomb-Linealen gesucht, speziellen Zahlenmengen, die für effiziente Codierung und Kommunikation nützlich sind.

SETI@home (Suche nach außerirdischer Intelligenz)
http://setiathome.berkeley.edu/
Analysiert Messwerte eines Radioteleskops und sucht nach Signalen, die von einer außerirdischen Intelligenz stammen könnten (Spektrum der Wissenschaft 1/2002, S. 109). Bislang haben 3,4 Millionen Nutzer mehr als 800 000 Jahre Prozessorzeit dieser Aufgabe gewidmet.

folding@home
http://folding.stanford.edu/
Dieses Projekt unter der Leitung des Chemikers Vijay Pande von der Universität Stanford simuliert die Faltung von Proteinmolekülen, etwa die des Beta-Amyloids, das in der Alzheimer-Krankheit eine entscheidende Rolle spielt. Der gegenwärtige Rekord steht bei 38 Mikrosekunden simulierter Faltzeit und übertrifft damit weit den vorherigen Rekord einer Mikrosekunde, der mehrere Monate Rechenzeit auf einem Cray-Supercomputer in Anspruch nahm.

Krebsforschungsprojekt von Intel und United Devices
http://members.ud.com/projects/cancer/
Sucht nach einem Krebsheilmittel, indem es 3,5 Milliarden Moleküle daraufhin testet, wie gut sie eines der acht Proteine binden, die Krebsgeschwüre zum Wachstum benötigen.

Speichern

Napster www.napster.com/
Ermöglichte Nutzern den Austausch digitaler Musikdateien. Eine zentrale Datenbank speicherte die Adressen aller Dateien, die Daten selbst wurden jedoch direkt vom Besitzer zum Empfänger übertragen. Nach einer Gemeinschaftsklage von Musikautoren und -verlagen musste Napster den Betrieb zunächst einstellen. Nach einem inzwischen geschlossenen Übereinkommen sollen Lizenzrechte an Napster übertragen und die Künstler bezahlt werden, aber der neue kostenpflichtige Service war Ende April 2002 noch nicht in Betrieb.

Gnutella www.gnutella.com/
Ein privates, sicheres Datenspeicherungs- und -übertragungssystem. Es gibt keinen zentralen Server. Stattdessen wird die Anforderung nach einer Datei wie ein Gerücht von Computer zu Computer verbreitet, bis sich einer meldet, der das Gewünschte hat.

Freenet http://freenetproject.org/
Ähnlich wie Gnutella, jedoch mit besserem Verfahren für das Auffinden von Dateien. Anforderer und Gastgeber von Dateien bleiben anonym. Der Besitzer eines Hosts weiß im Allgemeinen nicht, welche Dateien in seinem Speicher liegen, und kann deswegen auch nicht für sie verantwortlich gemacht werden.

Mojo Nation www.mojonation.net/
Ebenfalls ein Gnutella-ähnliches Projekt, in dem Dateien in kleine Fragmente zerlegt und auf verschiedenen Computern gespeichert werden, um die effektive Übertragungsrate beim Wiedereinsammeln zu erhöhen. Ein virtuelles Honorarsystem regt Nutzer dazu an, Ressourcen zur Verfügung zu stellen. Zurzeit (April 2002) nicht aktiv.

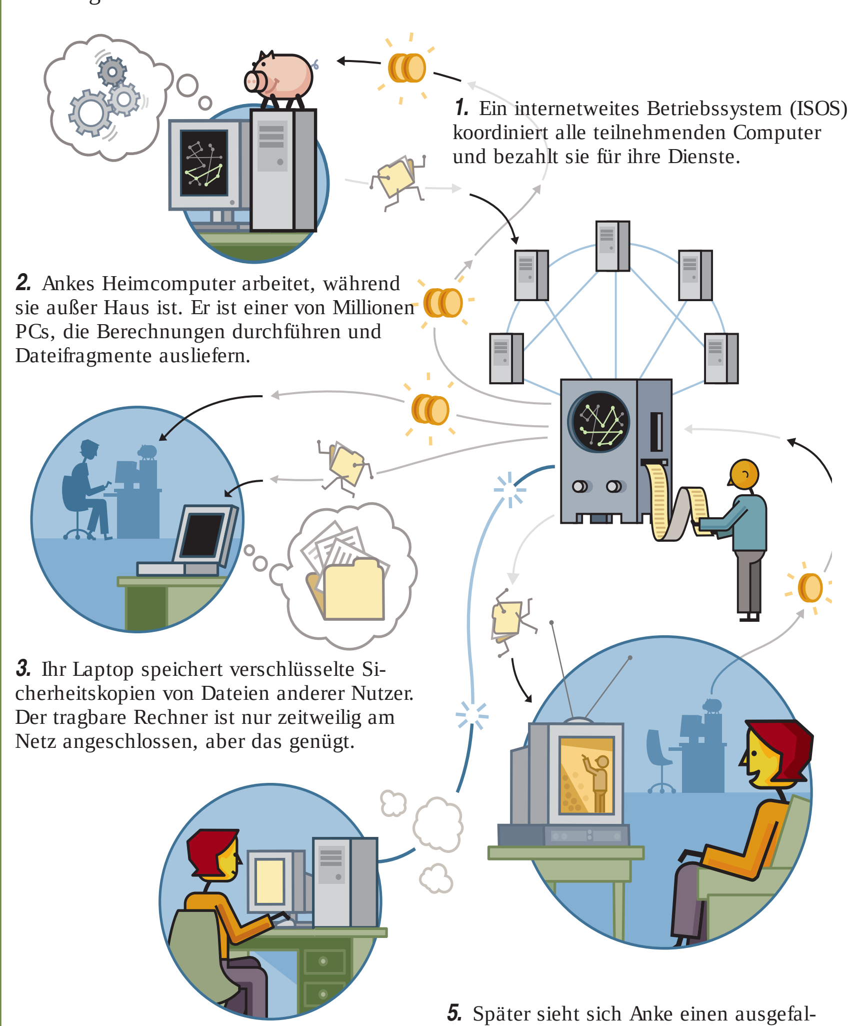
Fasttrack P2P Stack www.fasttrack.nu/
Ein Peer-to-Peer-System, in dem leistungsstärkere Computer bei Bedarf zu zentralen Adress-Servern werden. Diese Software liegt den Dateiaustauschsystemen Grokster, MusicCity („Morpheus“) und KaZaA zugrunde.

Ein Überblick über zahlreiche Peer-to-Peer-Systeme findet sich unter www.at-web.de/p2p/.

Computer mit Neben-

Der Segen eines internetweiten Betriebssystems

Mit internetweiten Anwendungen können PCs rund um die Welt arbeiten, statt untätig herumzustehen. Und so funktioniert's:



1. Ein internetweites Betriebssystem (ISOS) koordiniert alle teilnehmenden Computer und bezahlt sie für ihre Dienste.

2. Ankes Heimcomputer arbeitet, während sie außer Haus ist. Er ist einer von Millionen PCs, die Berechnungen durchführen und Dateifragmente ausliefern.

3. Ihr Laptop speichert verschlüsselte Sicherheitskopien von Dateien anderer Nutzer. Der tragbare Rechner ist nur zeitweilig am Netz angeschlossen, aber das genügt.

4. Während Anke an ihrem Computer arbeitet, wird dessen Arbeit fürs Netz automatisch ausgesetzt.

5. Später sieht sich Anke einen ausgefallenen Film an, der aus über das Netz gelieferten Dateifragmenten zusammengesetzt wird.

XPLANE

mend üblich, alle im Internet vorhandenen Ressourcen zu nutzen. Diese – Computer, die Daten verarbeiten oder speichern können, sowie die Netze, in denen die Daten übertragen werden – wären weiterhin Privateigentum, würden aber für alle gleichermaßen arbeiten. Die so genannten Hosts (wörtlich: Gastgeber) wären Computer aller Art: Laptops, PCs und große Server, sowie am Netzwerk angeschlossene Speichersysteme und vielleicht sogar die brieftaschengroßen Notebook-Computer.

Heute schon sind am Internet mehr als 150 Millionen Hosts angeschlossen, und ihre Zahl wächst exponentiell. Folglich könnte ein ISOS einen virtuellen Computer anbieten, der die 150-millionenfache Leistung eines Einzelgeräts bietet. Selbst wenn sich viele Nutzer diesen virtuellen Computer teilen müssen und man den zusätzlichen Verwaltungsaufwand in Betracht zieht, bleibt ein Computer, der größer, schneller und billiger ist als jedes Gerät, das sich ein Nutzer allein leisten könnte. Ständige Verbesserungen der Hardware lassen die Kapazität und Geschwindigkeit dieses Supercomputers sogar noch schneller wachsen als die Zahl der angeschlossenen Hosts. Darüber hinaus ist er wartungsfrei: Wenn ein Computer ausfällt, wird ihn sein Besitzer früher oder später reparieren lassen oder ersetzen; währenddessen läuft die große Maschine unbeeindruckt weiter.

Nehmen wir zum Beispiel Ankes Spielfilm. Seine Daten werden aus etwa 200 Fragmenten zusammengesetzt, deren gastgebende Computer gut und gerne über je eine antiquierte 56-Kilobit-Modemverbindung ans Netz angeschlossen sein können. Das ist zwar viel zu langsam, um ein Video in hoher Qualität zu zeigen; gemeinsam aber erreichen die 200 Computer eine Rate von 10 Megabit pro Sekunde: schneller noch als ein Kabelmodem.

Die in einem nichtlokalen System gespeicherten Daten sind – unter gewissen Sicherheitsvorkehrungen – von überall her abrufbar und können selbst Unfälle überstehen, die weite Teile des Netzwerkes außer Betrieb setzen. Auch gegen böswillige Angriffe ist das System robust: Ein Virus oder ein Hacker müsste schon in 10 000 Computer einbrechen, bevor erste Ausfälle auftreten.

Ein internetweites Betriebssystem kann für manche Zwecke die Grenzen des Möglichen, was Rechenzeit und Speicherplatz angeht, weiter hinaustreiben, für andere die Kosten senken und für dritte vielleicht gar nichts tun – es kann kein Allheilmittel sein. Außerdem sind zunächst etliche Hürden zu überwinden.

Einige dieser Schwierigkeiten liegen in der Natur der Ressourcen. Die Menge der zugänglichen Computer ist äußerst heterogen: Es finden sich die verschiedensten Prozessortypen, Betriebssysteme, Speicherkapazitäten und Übertragungsgeschwindigkeiten. Manche Hosts stecken hinter einer „Firewall“ oder einem ähnlichen Sicherheits-Softwaresystem, das dem ungehinderten Zugriff von außen entgegensteht. Viele sind nur zeitweilig aktiv: Schreibtischcomputer werden nachts abgeschaltet, Laptops und über Modem angeschlossene Systeme sind meist nicht online. Ständig und unvorhersehbar kommen neue Hosts hinzu, andere verschwinden.

Das ISOS darf die Betreiber der Hosts nicht – oder nur minimal – bei ihrer eigentlichen Arbeit stören und muss gewisse Vorschriften der Eigentümer beachten, wie eine Beschränkung der Nutzung auf die Nachtzeit oder auf bestimmte Arten von Programmen. Es kann sich jedoch nicht darauf verlassen, dass sein eigenes vorbildliches Verhalten mit gleicher Münze heimgezahlt wird. Nichts hindert den Eigentümer daran, nachzusehen und vielleicht auch zu beeinflussen, was auf seinem Computer ge- ▶

schieht. Unter 150 Millionen Nutzern gibt es mit Sicherheit mehr als einen böswilligen oder auch nur neugierigen, der versucht, das System zu stören, zu überlisten oder sein Verhalten zu manipulieren. Ein ISOS muss so gebaut sein, dass es derartige Attacken schadlos übersteht.



Wer bekommt was?

Zwei der Hauptaufgaben eines ISOS sind die Zuweisung („Allokation") von Ressourcen und die Findung eines angemessenen Preises für deren Nutzung. Ein der Ökonomie entlehntes Vermietungsmodell schlägt beide Fliegen mit einer Klappe. Den Anfang machten 1980 Wissenschaftler am Forschungszentrum Palo Alto von Xerox (Parc) mit einem Allokationsverfahren für Computerressourcen. Mojo Nation, ein Datentauschsystem im Stile der bekannt gewordenen Musiktauschbörse Napster, bietet Bezahlung in einer virtuellen Währung („Mojo") für die Nutzung von Computerressourcen. Auf der anderen Seite müssen die Nutzer selbst Mojos ans System zahlen, wenn sie seine Dienste in Anspruch nehmen. Solche Preissysteme schaffen einen Anreiz für den Nutzer, seine Ressourcen zur Verfügung zu stellen, und führen – zumindest in der Theorie – zu einer optimalen Auslastung der Ressourcen.

Selbst bei 150 Millionen bereitstehenden Hosts wird das ISOS mit „knapper" Ware handeln, denn es gibt immer Kunden, die Ressourcen in unbegrenzter Menge anfordern und im Prinzip auch nutzen können. Das ISOS hat zu entscheiden, welcher Kunde welchen Computer und welchen Speicherplatz nutzen darf; dabei muss es die für den Kunden preisgünstigste Lösung finden und zugleich fair sein, das heißt nicht einen Kunden auf Kosten anderer bevorzugen. Diese Forderungen genau zu definieren und Verfahren zu ihrer Erfüllung zu entwickeln, und sei es nur näherungsweise, ist gegenwärtig Gegenstand der Forschung.

Ein Spielfilm übers Netz – in Häppchen

Wie ein verteiltes Dateiensystem funktionieren könnte

Server für das internetweite Betriebssystem (*internet-spanning operating system, ISOS*)

ISOS-Agent

„Hostliste liefern"

Hostliste

Acme

Arbeit für Acme

ISOS-Agent

Filmservice-agenten

Film-fragmente

Filmbestellung

Film an Anke senden

Film-fragmente

1. Ein Internet-Filmverleih namens Acme bestellt vom ISOS-Server, der Verkehrsleitstelle des Systems, eine Liste von Speicherplatzlieferanten („Gastgebern", Hosts) und entrichtet eine Gebühr dafür.

2. ISOS weist seine Agentenprogramme auf den Host-Computern an, Aufgaben für Acme zu erfüllen. ISOS bezahlt die Hosts für die Nutzung ihrer Ressourcen.

3. Acme sendet an jeden Host zunächst seinen Filmserviceagenten, ein kleines spezialisiertes Programm, und dann Fragmente der Spielfilme, die es zu verleihen gedenkt.

4. Anke bestellt und bezahlt einen Spielfilm bei Acme.

5. Acme weist seine Agenten an, Anke den Film zu senden. Das ISOS bezahlt die Hosts für ihre Dienste.

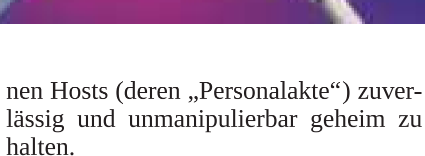
6. Hunderte von Hosts senden kleine Teile der Spielfilmdatei an Ankes internetfähigen Fernseher.

7. Anke genießt den wieder zusammengesetzten Spielfilm.

XPLANE



CORBIS



So sind Maßeinheiten für handelbare Waren zu bestimmen und auf deren Basis Preise, differenziert nach der Qualität der Ware. Eine solche Maßeinheit wäre etwa ein Megabyte Speicherplatzmiete für einen Tag, und der Preis hängt unter anderem davon ab, ob der gastgebende Computer ständig oder nur sporadisch verfügbar ist und wie schnell Daten aus diesem Speicher abrufbar sind. Das System muss darüber hinaus die Zahlungsweise (Vorkasse oder Kreditkarte) und das Verfahren der Preisfindung (durch Auktionen oder durch Makler) festlegen.

Innerhalb dieses Schemas muss das ISOS genau und zuverlässig über die Nutzung von Ressourcen Buch führen. Dazu gibt es eine interne Bank mit Konten für Anbieter und Verbraucher, über welche die Leistungen abgerechnet werden. Die Teilnehmer können die interne ISOS-Währung in echtes Geld umtauschen und umgekehrt. Außerdem muss das ISOS Garantiezusagen zur Verfügbarkeit von Ressourcen abgeben und einhalten: Anke fände es äußerst ärgerlich, wenn ihr Spielfilm in der Mitte plötzlich abbräche. Ein Anbieter kann die Nutzung seines Systems über den Preis sehr präzise steuern: Wenn er seine Rechenzeit zwischen 9 und 17 Uhr extrem teuer macht, hat er seinen PC tagsüber mit einiger Sicherheit für sich.

Wenn Geld im Spiel ist, reizt dies natürlich zu Betrug, und die Teilnehmer eines ISOS haben im Prinzip viele Möglichkeiten dazu. Anbieter von Ressourcen könnten etwa durch Manipulierung oder Täuschung des Agentenprogrammes Leistungen abrechnen, die sie nie erbracht haben. Forscher erproben statistische Verfahren zur Auffindung von fehlerhaften oder betrügerischen Hostcomputern.

Wenn ein Host einen Auftrag erhält, in einer Serie von Radioteleskop-Daten nach statistisch auffälligen Merkmalen zu suchen, könnte er nach angemessener Zeit die Auskunft „es gibt keine“ zurückmelden und dafür kassieren, obgleich er in der Zwischenzeit etwas ganz anderes getan hat. Gegen diese Art von Betrug hilft es, Zwischenergebnisse anzufordern, die der Host nur herausbekommt, wenn er die gesamte Rechnung wirklich ausführt, und die der Auftraggeber ohne große Mühe überprüfen kann. Gegen Betrug bei der Datenspeicherung oder sonstigen Dienstleistungen sind andere Verfahren erforderlich.

Auf die Dauer werden sich die Endverbraucherkosten für die Nutzung von ISOS-Ressourcen auf einen Bruchteil der Kosten einspielen, die durch ihren privaten Besitz entstünden. Im Idealfall wird dieser Bruchteil hoch genug sein, um die Computerbesitzer zur Teilnahme zu motivieren, und zugleich niedrig genug, um die internetweite Computernutzung attraktiv zu machen. Für den typischen PC-Nutzer könnte die Sache auf eine Art Tauschgeschäft hinauslaufen: Dafür, dass er seinen ansonsten unausgelasteten Prozessor und Festplattenplatz zur Verfügung stellt, bekommt er kostenlos Sicherheitskopien seiner Dateien im Netz oder Platz auf einem Server für seine Website.

Unserer Meinung nach sollte ein ISOS auf zwei Prinzipien beruhen: Das Betriebssystem, ein so genannter Mikrokern (*microkernel*), soll nur das Allernötigste enthalten, und der Betrieb soll durch zentrale Server gesteuert werden. Das Konzept eines minimalen Betriebssystems, das durch separate, leicht korrigier- und austauschbare Hilfsprogramme ergänzt wird, wurde vor allem von akademischen Projekten verfolgt und hat auch kommerzielle Produkte wie Windows NT beeinflusst. Die meisten bekannten Betriebssysteme sind jedoch keine Mikrokerne.

Ein bisschen Zentralisierung

Die Kern-Bestandteile eines ISOS sind die Allokation von Ressourcen, Prozessplanung (die Verwaltung von Warteschlangen für einzelne Aufträge, sowohl übers Netz als auch auf individuellen Hosts), Buchführung über die Nutzung von Ressourcen und elementare Verfahren für die Abarbeitung von Nutzerprogrammen. Dabei sollte das ISOS verfügbare Funktionen des lokalen Hostbetriebssystems nutzen, statt sie selbst zu enthalten.

Strittiger ist unser Konzept der Zentralisierung. Eine öffentlich-rechtliche Organisation oder ein Dachverband bedeutender Ressourcenanbieter und -verbraucher müsste ein Netz von zentralen Servern betreiben. (Mehrere konkurrierende ISOS-Netze sind denkbar, machen die Sache jedoch nicht einfacher.) Damit würden Machtstrukturen aufgebaut, die der egalitären Philosophie zuwiderlaufen. Aber zentrale Server sind unerlässlich, um Abrechnungsdaten und ähnlich wichtige Informationen über die einzelnen Hosts (deren „Personalakte“) zuverlässig und unmanipulierbar geheim zu halten.

Gegen eine zentralisierte Struktur wird regelmäßig eingewandt, dass sie mit zunehmender Anzahl der Hosts immer schwerfälliger werde und der Ausfall des einen zentralen Servers das ganze System lahm legen würde. Diese Befürchtungen sind jedoch unbegründet. Immerhin hat der einzige Server von Napster 60 Millionen Kunden bedient. Zudem können die wichtigen Informationen über sämtliche Hosts ohne weiteres auf einer angemessenen Zahl von Servern gespeichert sein, die sich regelmäßig über den neuesten Stand der Informationen verständigen und bei Ausfällen füreinander einspringen. Drittens funktionieren die meisten Dienste eines ISOS selbst dann noch eine Weile, wenn gar kein Server erreichbar ist. Nur die Abrechnung und die Verfolgung von Betrügern kommen dann vielleicht etwas verspätet.

In der Personalakte eines Hostcomputers stehen

- dessen individuelle Eigenschaften wie Betriebssystem, Prozessortyp und Rechengeschwindigkeit, gesamter und verfügbarer Festplattenspeicherplatz, Größe des Arbeitsspeichers sowie statistische Daten darüber, wann und mit welcher Datenrate er eingeschaltet und erreichbar ist;
- die Regeln, die der Eigentümer für die Nutzung des Hosts festgelegt hat;
- die Ressourcen, die in diesem Moment von einem auswärtigen Programm genutzt werden, sowie die Warteschlange der noch zu erledigenden Aufträge.

Wer seinen Computer dem Netzwerk anbieten möchte, benachrichtigt den Serverkomplex, zum Beispiel über eine Website. Von dort lädt er das ISOS-Agentenprogramm herunter, installiert es, trägt die Daten seines Computers in dessen Personalakte ein und so weiter. Der so installierte lokale ISOS-Agent empfängt hin und wieder vom Serverkomplex eine Liste von Aufgaben und lässt sie abarbeiten, soweit Ressourcen zur Verfügung stehen.

Wer Ressourcen mieten möchte, sendet eine Bestellung an den Serverkomplex, zusammen mit den Programmen, die auf anderen Hosts laufen sollen (Kasten Seite 84). Dabei kann er vom ISOS eine Liste von Hosts anfordern, die für die von ihm zu vergebenden Arbeiten geeignet und preisgünstig sind. Wenn der Mieter etwa ein Dienst für Sicherheitskopien ist, würde er mit Hosts auskommen, die wie Ankes Laptop nur zeitweilig am Netz angeschlossen und deswegen billiger sind als allzeit bereite Geräte. Anhand dieser Liste nimmt das Agentenprogramm des Bestellers mit den Agenten der Hosts direkt Kontakt auf; wenn zu viele Hosts nicht mehr verfügbar sind, holt es sich eine frische Liste vom Server. Während die Dienste der „Lieferanten“, das heißt der Hosts, welche die Sicherheitskopien beherbergen, über das ISOS bestellt, erbracht und abgerechnet werden, ist die Beziehung des Sicherungsdienstes zu seinen Kunden, das heißt zu den Computerbesitzern, die ihre Daten gesichert haben wollen, vom ISOS völlig unabhängig. Dem steht nicht entgegen, dass in diesem Beispiel die Kunden und die Lieferanten im Wesentlichen dieselben Computer sind.

Im Prinzip lässt sich auf den Grundfunktionen eines ISOS – Ressourcenallokation, Warteschlangenverwaltung und Kommunikation – ein weites Spektrum von Anwendungsprogrammen aufbauen. Diese werden jedoch eine Reihe wichtiger Komponenten gemeinsam haben. Es wäre hilfreich, wenn diese in einer Softwarebibliothek zum Einbau in spezielle Programme zur Verfügung stünden, insbesondere:

Standortunabhängiges Routing: Ein ISOS-basiertes Programm schickt typischerweise Kopien seiner selbst zusammen mit jeweils verschiedenen Eingabedaten, an denen die Berechnungen zu vollführen sind, an Millionen von Hosts und muss hinterher wieder mit ihnen Kontakt aufnehmen, um die Ergebnisse einzusammeln. Um dies zu vereinfachen, merkt sich das Programm nicht direkt, wohin es einen Klon geschickt hat, sondern gibt ihm eine Nummer, den *global unique identifier* (GUID). Die Information, wo das zu einer Nummer gehörige Objekt steckt, steht woanders. Das übergeordnete Programm kann also ein Objekt anfordern, ohne dessen Adresse zu kennen. Dazu müsste zum Beispiel auf einem speziellen Computer ein Adressverzeichnis (eine GUID-Datenbank) liegen, aber der wäre mit den Anfragen

Literaturhinweise

Peer-to-Peer: Harnessing the Power of Disruptive Technologies. Von Andy Dram (Hg.). O'Reilly & Associates, 2001.

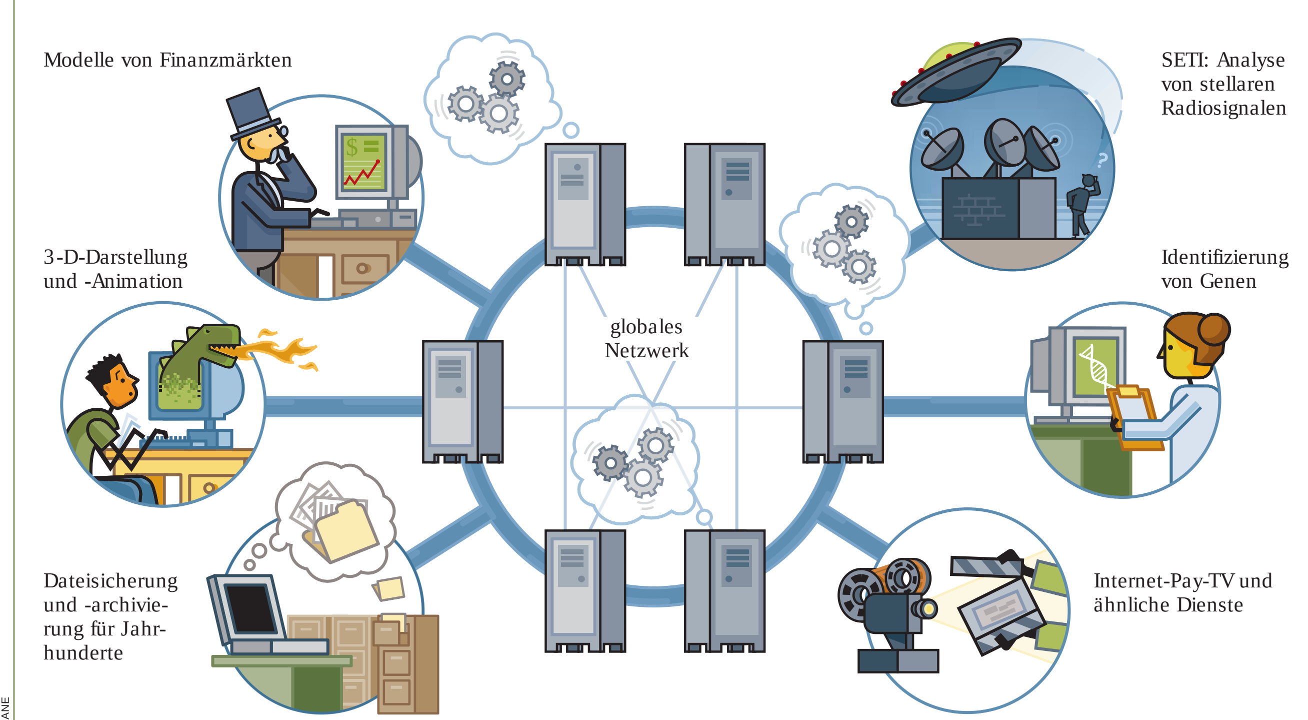
The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure. Von Ian Foster und Carl Kesselman (Hg.). Morgan Kaufmann, 1998.

The Ecology of Computation. Von B. A. Huberman. North-Holland, 1988.

*Weblinks zum Thema und Informationen finden Sie bei **www.spektrum.de** unter „Aktuelles Heft“.*

Anwendungen eines internetweiten Betriebssystems

Ein ISOS könnte kurzen Prozess mit langwierigen Berechnungen und aufwendiger Datenspeicherung machen, indem es die massive, über das Netz verfügbare Rechenkapazität unterbelasteter Computer nutzt. Einige Beispiele:



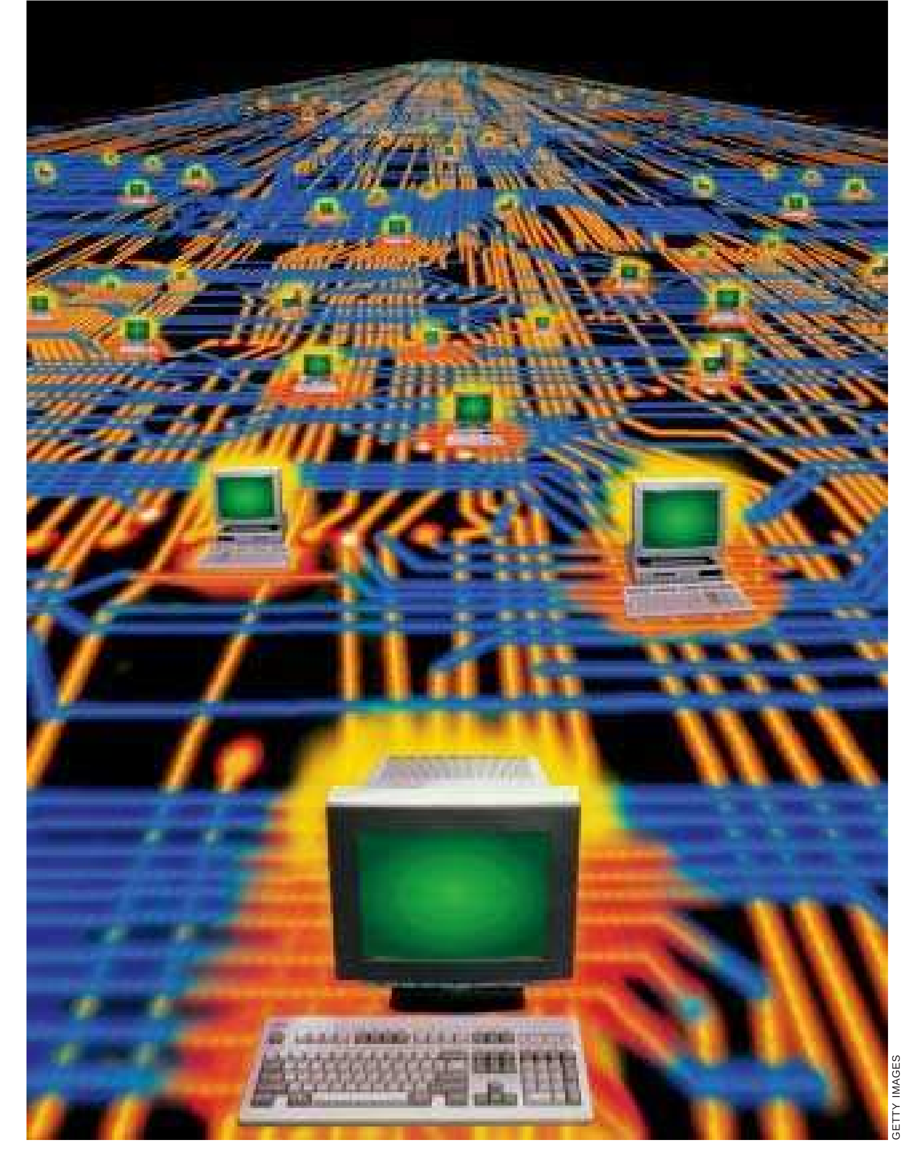
XPLANE

von Millionen von Hosts überfordert. Stattdessen verteilt die ISOS-Softwarebibliothek diese Datenbank auf mehrere Hosts. Das Projekt OceanStore für permanente Datenspeicherung, an dem gegenwärtig an der Universität von Kalifornien in Berkeley geforscht wird, ist ein Beispiel eines solchen nichtlokalen Systems.

Robuste Datenspeicherung: Vom ISOS gespeicherte Daten müssen eine Reihe denkbarer Katastrophen überstehen. Zu diesem Zweck sorgen spezialisierte Hilfsprogramme für die Verschlüsselung, Rekonstruktion und Reparatur von Dateien. Für größte Haltbarkeit werden Daten mit einem „*m*-aus-*n*“-Code verschlüsselt. Das Prinzip ist ähnlich dem eines Hologramms, bei dem ein kleines Stück ausreicht, um das gesamte Bild wiederherzustellen. Der Codiervorgang zerlegt die Information in *n* Fragmente (und legt sie auf *n* verschiedenen Hosts ab), von denen *m* ausreichen, um die gesamte Information zu rekonstruieren. Typischerweise macht das System aus einem Dokument 64 Fragmente, die es auf ebenso viele Hosts verteilt; aber bereits mit 16 dieser Fragmente ist das Dokument wiederherstellbar. Es gibt auch ein Reparaturprogramm, das ein einzelnes verlorenes Fragment aus den anderen wiederherstellt, ohne das komplette Dokument erzeugen zu müssen. Richtig installiert kann ein solches System Daten für Hunderte von Jahren zuverlässig speichern.

Sichere Updates: Ein weiteres Problem besteht darin, gespeicherte Daten zuverlässig auf den neuesten Stand zu bringen. Eigentlich müssten alle existierenden Fragmente eines Dokuments aufgefrischt werden; einige von ihnen sind aber möglicherweise vorübergehend unzugänglich. Wer auf die neueste Version eines Dokuments zugreifen will, muss sicher sein, dass ihm weder ein veraltetes noch ein verfälschtes Fragment untergeschoben wird. Vielleicht sind auch manche der Server, auf denen die Adressen (GUIDs) der Fragmente lagern, ausgefallen oder manipuliert. Gegen solche Probleme hilft ein so genanntes byzantinisches Abstimmungsprotokoll, eine verfeinerte Form der Mehrheitsentscheidung: Indem die beteiligten GUID-Server einander nach einem festgelegten Protokoll gewisse Nachrichten zusenden, kommen sie selbst dann zu einem korrekten Ergebnis, wenn ein Drittel von ihnen konspiriert, um den Prozess zu manipulieren.

Andere Werkzeuge: Darunter fallen vor allem Verfahren zur Konversion zwischen den Datenformaten verschiedener Hosts und zum Abgleich gemeinsamer Datenbestände.


GETTY IMAGES

Ein ISOS leidet unter einem vertrauten Dilemma, das der Einführung neuer Technologien regelmäßig im Wege steht. Ohne großen Nutzerkreis werden nur wenige ISOS-Anwendungsprogramme geschrieben werden, aber solange nur wenige Programme zur Verfügung stehen, bleibt der Nutzerkreis klein. Erreicht man aber die kritische Masse, indem man etwa genügend viele Entwickler und Nutzer von den Annehmlichkeiten eines solchen Systems überzeugt, wird es sich schnell ausbreiten.

Gemessen an dem immensen Reichtum an Ressourcen, die das Internet bietet, ist es noch immer weitgehend ungenutzt. Die rasend schnell gewachsene Popularität des World Wide Web hat daran nichts geändert – sie hat nur den verfügbaren Reichtum gewaltig vermehrt. Mit einem internetweiten Betriebssystem können Programmierer Anwendungen für diesen Weltcomputer entwickeln, ohne sich um die Hardware zu kümmern. Wer weiß, was dabei herauskommen wird? Anke und ihre Computer werden Dinge tun, die wir uns noch nicht einmal vorstellen können. ■




David P. Anderson und **John Kubiatowicz** *arbeiten an der Universität von Kalifornien in Berkeley. Anderson war Mitglied der Informatikfakultät von 1985 bis 1991. Er ist heute Direktor des Projekts SETI@home und wissenschaftlicher Direktor von United Devices, einem Hersteller von nichtlokaler Anwendersoftware in Verbindung mit dem Projekt distributed.net. Kubiatowicz ist Assistenzprofessor für Informatik in Berkeley und Hauptarchitekt von OceanStore, einem experimentellen nichtlokalen Speichersystem mit vielen für ein ISOS erforderlichen Eigenschaften.*

AUTOMATION

Koteletts aus der Maschine

Kosten senken, Qualität verbessern – die Fleisch verarbeitende Industrie muss automatisieren. Doch so leicht ist der Mensch nicht zu ersetzen.

Von Julien Huen, Elsa Huen und Claus Kuhn

Metzger leisten Knochenarbeit. Ob sie auf dem Schlachthof die toten Tiere grob zerlegen oder in den Produktionshallen eines Industrieunternehmens Koteletts entbeinen und verpacken – es kostet Kraft. Gleichzeitig erfordert diese Arbeit aber auch Geschick und Erfahrung, sodass Automaten kaum zum Einsatz kommen. Das Resultat: Die Betriebe wenden für das Personal rund 75 Prozent der Produktionskosten auf, der Anteil liegt in der Lebensmittelindustrie sonst bei durchschnittlich 57 Prozent. Gleichzeitig belastet ein hoher Krankenstand die Gewinnmarge.

Auf der anderen Seite erscheint der Beruf des Fleischers vielen Jugendlichen nicht mehr attraktiv, deshalb droht ein Mangel an qualifizierten Mitarbeitern. Schließlich bringt die Handarbeit noch ein drittes Problem mit sich: Trotz aller Sorgfalt können Bakterien die Produkte kontaminieren.

Sollen deutsche Unternehmen dieser Branche gegen Billigimporte bestehen, geht deshalb kein Weg an einer weitgehenden Automatisierung der gesamten Prozesskette der Fleischverarbeitung vorbei, die mit der Schlachtung beginnt und bei Fertigprodukten wie Kotelett, Steak, Wurst oder Schinken endet.

Was Maschinen heute schon bewältigen, sind relativ einfache Einzelprozesse wie der Transport zwischen Verarbeitungsstationen, das Hacken von Rindfleisch oder das Verpacken. Beim Nasspökeln beispielsweise laufen Schinken auf einem Transportband an einer automatischen Station vorbei, die mit Nadeln eine salzhaltige Lösung einspritzt, um das Wachstum von Mikroben zu hemmen und die Farbe zu stabilisieren.

Doch selbst wenn solche Möglichkeiten zur Verfügung stehen, werden sie nicht unbedingt genutzt. Eine im vergangenen Jahr von uns durchgeführte Umfrage ergab, dass nur ein Viertel der deutschen Fleischproduzenten den Automatisierungsgrad ihrer Produktion als hoch oder sehr hoch einschätzt. Historisch bedingt dominieren hier zu Lande nämlich kleine, handwerkliche Betrieben die Branche. Anders in Dänemark: Konzentration und Rationalisierung förderten dort in den letzten Jahren hochautomatisierte Fabriken. Beispielsweise produziert der Konzern Danish Crown nach eigenen Angaben 75 Prozent des nationalen Schweinefleischs und 60 Prozent des in Dänemark verzehrten Rindfleischs bei einem Umsatz von 5,4 Milliarden Euro. Dabei profitiert der Konzern unseres Erachtens von einer im Vergleich zu Mittel- und Südeuropa schlichteren Produktpalette und einer geringeren Zahl an Nutztierrassen. Da ihre Rohstoffe homogener sind und sich die Nachfrage auf eine begrenztere Anzahl von Produktkategorien konzentriert, können nordeuropäische Länder generell ihre Fleischverarbeitung leichter rationalisieren.

Ob die vielen deutschen „Davids“ gegen die wenigen „Goliaths“ vom Zuschnitt Danish Crowns bestehen können? In jedem Fall ist eine stärkere Automatisierung unabdingbar. Doch die heute verfügbaren Maschinen und Anlagen werden erst bei sehr hohen Stückzahlen rentabel, für kleinere Betriebe erweisen sie sich manchmal als überdimensioniert und oft als unflexibel: Gerade dort müsste eine Anlage beispielsweise Fleischprodukte mal unter Vakuum, mal unter Luft oder einer speziellen Gasatmosphäre verpacken. Wie in anderen Branchen auch, könnte ein modularer Aufbau die Lösung sein: Die Maschinen würden dann kundenspezifisch aus standardisierten Komponenten aufgebaut. Dabei blieben einige Funktionen stets erhalten wie etwa die Handhabung des Verpackungsmaterials oder die Versiegelung, andere würden kurzfristig ausgetauscht.

Fleisch wird noch meist von Hand fein zerlegt und vom Knochen getrennt.



ITEC GMBH

E+V TECHNOLOGY GMBH



ITEC GMBH

Anhand eines digitalen Bildes einer Schweinehälfte (oben) lassen sich wirtschaftsrelevante Parameter wie Bauch-, Schinken- und Kotelettmaße ermitteln. Beim groben Portionieren helfen Kreissägen (rechts). Der Metzger muss die Stücke nur richtig auf das Band legen.

Darüber hinaus fehlen Technologien für komplexere Aufgaben. Insbesondere bei der Zerlegung von Fleisch bietet sich derzeit eher eine Halbautomatisierung, also eine maschinelle Unterstützung der Fleischer an. Das ist technisch leichter zu realisieren und in jedem Fall bezahlbarer als eine Vollautomatik. Ein Beispiel dafür ist eine Anlage zum Entbeinen von Kotelettsträngen, die unser Institut im Auftrag und in Zusammenarbeit mit der Schmid & Wezel GmbH & Co. KG im baden-württembergischen Maulbronn entwickelt hat. Ein Mitarbeiter positioniert die Kotelettstränge manuell in der Maschine. Speziell geformte und federnd gelagerte Klingen werden dann von Pneumatikzylindern über so genannte Kulissen durch die Rohware geführt. Diese Schablonen geben den groben Schnittverlauf vor und heben die Messer im Anfangsbereich über die Knochen. Die Federung drückt die Klingen immer wieder an und sorgt so dafür, dass sie auch ohne aufwendige und teure Sensorsysteme am Knochen entlangfahren. Zwar bleibt daran etwas mehr Fleisch hängen als bei der reinen Handarbeit, die reduzierten Personalkosten machen das aber mehr als wett: Mit Hilfe der Maschine kann ein Mitarbeiter fast doppelt so viele Kotelettstränge in der Stunde entbeinen wie von Hand, und das bei geringerer Unfallgefahr und körperlicher Belastung

Feinfühlige Metzgermesser

Auch für die Grobzerlegung eignen sich halbautomatisierte Anlagen: Die Mitarbeiter müssen die Zerlegemaschinen nur richtig an den Halbschlachtkörpern positionieren. Der Schnitt erfolgt dann automatisch. Es gibt zwar bereits erste kommerzielle Systeme für die vollautomatisierte Zerlegung von Schweinen, doch ist das Thema noch weitgehend Metier der Forschung. Spezielle Sensorsysteme messen dabei die Eigenschaften der einzelnen Fleischstücke, Prozessoren verarbeiten die Daten und führen die Schnittsysteme.

Das Kernproblem ist, eine Schnittbahn zu finden, durch die sich bei der Großzerlegung beispielsweise der Brustbereich mit den Kotelettsträngen vom Bauchfleisch, beim Feinzerlegen das Fleisch möglichst vollständig vom Knochen lösen lässt. Aktuelle Projekte versuchen eine primäre Bahn aufgrund der sichtbaren anatomischen Merkmale des Schlachttieres festzulegen. Das gelingt anhand digitaler Videobilder, doch die unter der Oberfläche liegenden Fleisch- und Knochenstrukturen müssen extrapoliert werden.

Sensorgestützt oder – beim halbautomatischen Betrieb – mit dem von uns entwickelten Federsystem lässt sich die primäre Bahn dann individuell den Gegebenheiten anpassen. Die Kollegen vom Institut National de la Recherche Agronomique INRA in Clermont-Ferrand ▶

Optimierte Hygiene

Schinken im Reinraum

Totes Fleisch verändert Farbe, Geschmack und Textur, wenn es von Mikroorganismen befallen wird. Manche Bakterien können den Darm des Essers besiedeln und krank machen. Deshalb ist Hygiene in der Fleischverarbeitung oberstes Gebot. Die größte Gefahr der Kontamination stellen die Mitarbeiter selbst dar. Deshalb entschied sich ein deutscher Großproduzent von Rohwürsten bereits dafür, ausschließlich Schweinefleisch aus der hochautomatisierten dänischen Produktion zu verarbeiten.

Eine Lösung des Problems bietet die beispielsweise in der Chipfertigung oder der pharmazeutischen Industrie etablierte Reinraumtechnik in Kombination mit einer weitgehenden Automatisierung. Das Produkt wird in einer abgeschirmten Umgebung – dem Reinraum – verarbeitet, in der die Menge der Mikroorganismen unter bestimmten, in internationalen Normen definierten Grenzen gehalten wird. Dazu dienen geeignete Luftfilter, Produktionsverfahren und Maschinen, die Reinigung und Desinfektion von Oberflächen, Verhaltensregeln für das Personal sowie umfangreiche Kontrollmaßnahmen.

Ein Beispiel für den erfolgreichen Einsatz der Reinraumtechnik in der Fleisch verarbeitenden Industrie gibt die französische Firma Madrange. In ihrer Kochschinken-Produktion erfolgen alle Stadien, die auf das Kochen folgen, also Entpacken, Transport, Schneiden und Verpacken, unter Reinraumbedingungen mit steigendem Reinheitsgrad. Das Unternehmen erreicht somit Kontaminationswerte von 100 Mikroorganismen/Gramm (Gesamtmikroflora) unmittelbar nach der Produktion, obgleich der Gesetzgeber das Tausendfache zulässt. Dadurch erhöht sich nicht nur die Haltbarkeit, sondern auch die Sicherheit, pathogene Mikroorganismen zu vermeiden.



MADRANGE

Verpacken von Kochschinken im Reinraum verringert die Gefahr der Kontamination mit Mikroben.

(Frankreich) integrieren sogar Mikrowellen-Sensoren in die Klingen, um in Echtzeit die Entfernung zu Gewebegrenzflächen zu bestimmen. Sobald sich die Klinge einem Knochen auf drei Millimeter genähert hat, erkennt das System die Gefahr und regelt nach. Gemeinsam mit dem schwedischen Forschungsinstitut Swedish Meat R&D in Kävlinge haben wir einen Roboter entwickelt, der wie ein Fleischer seinen Schnitt anhand des mechanischen Widerstands der Knochen korrigiert.

Techniken der Bildverarbeitung dürften übrigens in Zukunft auch bei der Bestimmung des Handelswertes der Schlachtkörper eingesetzt werden (nach diesem Wert richtet sich die Bezahlung der Züchter und die Weiterverarbeitung). Beim Schweinefleisch beispielsweise spielen Parameter wie die Speckdicke in Lende und Rücken sowie die Bauch-, Schinken- und Kotelettmaße eine entscheidende Rolle. Die Firma e+v Technology in Oranienburg hat ein vollautomatisiertes Verfahren entwickelt, das die manuelle Erfassung ersetzen kann.

Automatisierung kann auch die Qualität der Produkte verbessern. Das erfordert eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Ernährungswissenschaftlern, Biologen und Ingenieuren. So verbessert sich die Hygiene durch Automatisierung nicht zwangsläufig. Regeln für die hygienische Gestaltung von Maschinen und Anlagen sind aber bis heute nur teilweise vorhanden und bedürfen weiterer Forschungsarbeiten.

Obgleich die Fleischmenge für den deutschen Markt in den nächsten Jahren höchstwahrscheinlich bei etwas über sechzig Kilogramm pro Einwohner und Jahr stabil bleiben wird, glauben die meisten Analysten, dass die Produktionswege sich verändern werden. Insbesondere bei Standard- und Low-Cost-Produkten dürfte auch hier zu Lande eine Konzentration der Unternehmen kaum ausbleiben, um wie in anderen Industriebranchen die Kosteneinsparungen bei Massenproduktion auszuschöpfen. Kleinen Unternehmen bleiben vor allem die Premium- und Regional-Segmente sowie eine flexible und qualitätsorientierte Automatisierung vorbehalten. ■





Claus Kuhn *(links) studierte in Stuttgart Maschinenbau. Er leitet die Abteilung „Neue Produktionen" des Fraunhofer-Instituts für Produktion und Automatisierungstechnik (IPA) in Stuttgart.* **Elsa Huen** *studierte Nahrungsmittel- und Agrarwissenschaft in Lille, ihr Mann* **Julien Huen** *Lebensmittelwissenschaft und Technologie in Dijon. Beide entwickeln in der genannten Abteilung Verfahren zur Automatisierung und Hygienesicherung.*

Verkehrsmanagement

Stauprognose mit Infrarot-Kameras

Wer in Ballungsgebieten Auto fährt, fürchtet Staus und Behinderungen. Manche nutzen bereits die Dienste von Leitzentralen und erfragen günstige Strecken. Doch es mangelt an einer verlässlichen Erfassung der Verkehrsdichte. Wohl sind einige wichtige Hauptachsen mit Detektoren ausgestattet, die eine mittlere Geschwindigkeit pro Straßenabschnitt messen, doch Nebenstrecken bleiben *terra incognita*. Um nicht auf freiwillige Melder angewiesen zu sein, könnten einige Fahrzeuge ihre Geschwindigkeit senden. Hinreichend viele vorausgesetzt, ließe sich ein Gesamtbild erschließen, doch eben nur dann.

Ob eine Verkehrszählung aus der Luft vorteilhafter sei, untersuchte Frithjof Voss vom Institut für Geographie der Technischen Universität Berlin im Auftrag des Herstellers BMW. Drei Sensorsysteme kamen prinzipiell in Frage: Video- und Wärmekameras sowie Radargeräte. Während Erstere Sonnenlicht und wolkenfreien Himmel voraussetzen, ermöglichen Radargeräte theoretisch die Beobachtung der Straßen zu jeder Tageszeit und bei jedem Wetter. Doch der technische Aufwand solcher Systeme ließe sich derzeit kaum finanzieren. Hingegen erwiesen sich kommerzielle Infrarot-Kameras als gut geeignet, aus luftiger Flughöhe den Verkehrsfluss zu messen. Einzige Einschränkung: Der Sensor muss unterhalb einer eventuellen Wolkendecke fliegen. Schon geringe Wärmeunterschiede zwischen Autos und Fahrbahn reichen dann für die Erkennung und Klassifikation aus (siehe Bild). Zu diesem Zweck modifizierten Voss und seine Mitarbeiter eine eigentlich für Materialprüfung entwickelte Software.

Zunächst ermittelt ihr Programm durch statistische Analysen der aufgenommenen Grauwerte einen Schwellenwert, um die Silhouette der Straße aus einem Bild herauszuarbeiten. Das Ergebnis ist ein Hintergrundbild der Straße. Anhand dieser Referenz – und nur begrenzt auf den Straßenbereich – werden dann Objekte freigestellt und wieder mittels Schwellenwerten mögliche Fahrzeuge identifiziert. Um Irrtümer auszuschließen und zudem nach Pkw, Transporter oder Lkw/Bus zu klassifizieren, ersetzt das Programm die freigestellten Pixelflächen durch Rechtecke und bestimmt Parameter wie das Größenverhältnis oder die Grauwertverteilung.


TU BERLIN / BMW

Im Sommer sind Autos kühler als die Straße und zeichnen sich im Wärmebild deutlich ab.

Aus 500 Metern Flughöhe erfasste die Kamera bei Tests in Berlin einen 250 Meter breiten Streifen, die Daten wurden zu Boden gefunkt und nahezu in Echtzeit verarbeitet. Die Erkennungsquote betrug etwa 85 Prozent. Fehler, wie sie beispielsweise Schattenwurf und Bäume am Straßenrand verursachen können, sollten sich durch eine Kombination mit elektronischen Straßenkarten weiter reduzieren lassen. Die technische Durchführbarkeit eines solchen Gesamtsystems will BMW mit dem Anwendungszentrum intermodale Verkehrstelematik Berlin jetzt in einer Pilotstudie testen.

Klaus-Dieter Linsmeier

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

MENSCH-MASCHINE-INTERAKTION

Redselige Chips

Wenn Computer Gesten und Mimik zu deuten wissen, verstehen sie auch Feinheiten der Sprache.

Von Christine Ritschel

Sie wünschen?" „Ich muss heute Mittag nach München, wann fährt da der nächste Zug? Und können Sie nachschauen, wie ich da vom Bahnhof zur Uni komme?" Ein solcher Dialog sollte einem Beamten der Bahnauskunft weiter keine Probleme machen. Er weiß, wo er sich gerade befindet, kann auf einer Uhr die Tageszeit ablesen und versteht die Fahrpläne zu lesen. In wenigen Jahren sollen computergesteuerte Kommunikations-Kioske auf Flughäfen und Bahnhöfen den Beamten ersetzen.

Das ist eines der Anwendungsszenarien für eine neue Generation von Mensch-Maschine-Interaktionen. Die erforderliche Technologie zu entwickeln scheint den Unternehmen der Kommunikations- und Informationstechnik ein Gebot der Stunde. Microsoft-Gründer Bill Gates sieht nur dann Chancen für eine Erweiterung des Marktes für Anwendersoftware, wenn selbst ein Computerlaie sie über eine auf ihn abgestimmte und intelligente Schnittstelle bedienen kann. Die geradezu universelle Einsetzbarkeit von Computerchips selbst in Haushaltsgeräten verleiht der Forderung Nachdruck.

Wie eine natürliche Bedienung eines elektronischen Geräts aussehen könnte, erforscht Wolfgang Wahlster, Institutsleiter und Geschäftsführer des Deutschen Forschungszentrums für Künstliche Intelligenz (DFKI) in Saarbrücken. Für das Projekt „Sprachverstehende Computer als Dialog- und Übersetzungsassistenten" (Verbmobil) erhielt er im vergangenen Jahr den Deutschen Zukunftspreis für Technik und Innovation. Das Folgeprojekt „SmartKom" soll nun die Spracherkennung durch zusätzliche Bildverarbeitung und Wissensdatenbanken verbessern sowie um Assistenzfunktionen erweitern.

Verbmobil erkennt, analysiert und übersetzt Spontansprache mit allen ihren Ungereimtheiten und Versprechern in eine andere Sprache (Spektrum der Wissenschaft 3/1994, S. 99). Nicht weniger als dreißig deutsche Hochschulen, Forschungsinstitute und Unternehmen waren an der Entwicklung beteiligt. Auf dem amerikanischen Markt waren sprachgesteuerte Diktiersysteme allerdings kein Erfolg: Ein Jahr nach der Einführung 1997 benutzten nur noch etwa zehn Prozent der Käufer ihr Gerät, weil die Fehlerrate trotz sprecherabhängigen Trainings bei fünf bis zehn Prozent blieb. Je natürlicher der Benutzer sprach, desto höher fiel sie aus. Im nächsten Schritt bezogen die Wissenschaftler deshalb auch den Kontext eines Satzes in die Sprachverarbeitung mit ein, ebenso dialektische Sprachfärbungen, Betonungen sowie die Satzmelodie. Nicht anders erschließt sich auch der Mensch den Inhalt von Gesagtem.

Doch um einen Sachverhalt fehlerfrei zu erkennen und zu übersetzen, ist oft auch Wissen um den Gesprächsgegenstand erforderlich. Beispielsweise lässt eine Verabredung „zum Essen" im Deutschen die Tageszeit offen, eine Übersetzung ins Englische sollte aber zwischen *lunch* (Mittagessen) und *dinner* (Abendessen) unterscheiden. Dazu müssen ganze Wortwendungen, Satzbruchstücke und Idiome mit Wissen verknüpft in Datenbanken hinterlegt werden. Weil die große Datenmenge nicht anders zu bewältigen wäre, separiert Verbmobil die Bereiche Reiseplanung, Hotel- und Gaststättenreservierung, Konferenzen und Terminplanung und nutzt für Deutsch, Englisch oder Japanisch jeweils andere Wissensquellen.

Auf dieser Sprachtechnologie basieren mittlerweile einige Telefonauskunftssysteme, die der Benutzer wohl kaum sonderlich wahrnimmt. Dazu gehört ein Börsentelefon von Sympalog, die Bahnauskunftssysteme Taba von Philips und Oscar von DaimlerChrysler sowie Alf von DaimlerChrysler, das über Abflug- und Ankunftszeiten der Lufthansa informiert. Der Automobilkonzern bietet als Sonderausstattung eine sprachgesteuerte Bedienung für Telefon und Klimaanlage an. Weitere derartige Funktionen für nicht sicherheitsrelevante Komponenten wie Navigationssystem, Radio, CD-Player oder Fensterheber kommen noch in diesem Jahr auf den Markt.



DFKI

In naher Zukunft sollen Kommunikations-Kioske an Flughäfen, Bahnsteigen und zentralen Plätzen im Dialog beispielsweise Auskünfte zu Bahn- und Flugplänen, zum Stadtplan, Hotels und Kinos geben.

gesprochene Eingabe

akustische Sprachanalyse: Wortlisten → **Spracherkennung** — Was hat der Sprecher gesagt?

Grammatik: Wortbedeutung → **Sprachanalyse** — Was hat der Sprecher gemeint?

Gesprächskontext, Mimik und Gestik → **Sprachverstehen** — Was will der Sprecher?

Reduktion von Unsicherheit

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; QUELLE: DFKI

Was uns ein Gegenüber mitteilen will, erkennen wir in einem mehrstufigen Prozess, der mehr und mehr Informationen einbezieht, um die mögliche Bedeutung von Gesprochenem immer stärker einzugrenzen.





Ein elektronischer Touristenführer (links) soll seinen Besitzer künftig sogar verstehen. Mobile Handgeräte werden auch den Zugang zum Internet herstellen, um Börseninformationen abzufragen. Eine echte Erleichterung im Alltag soll das rechts abgebildete System bieten: Die umgangssprachliche Steuerung der Haustechnik, vom Garagentor bis zur Programmierung des Videorekorders.

DFKI

DFKI

Inzwischen erreicht Verbmobil in kommerziellen Systemen eine Trefferquote von etwa 95 Prozent – zumindest solange das zu verarbeitende Sprachsignal ungestört ankommt. Was aber, wenn der Bahnreisende unseres Eingangsbeispiels seine Anfrage undeutlich nuschelt? Und wie soll der Computer erkennen, dass ein „Wenn es geht, noch heute" ironisch gemeint ist, selbst wenn er mit Ironie und Sarkasmus umzugehen wüsste? Menschen lösen dieses Problem, indem sie weitere Informationsquellen in die Sprachverarbeitung einbeziehen, und genau das soll SmartKom auch: Deuten und Verstehen von Gestik und Mimik soll die Fehlerrate weiter senken. Auch das Wissen um den Gesprächsgegenstand muss ausgebaut werden.

Um den Mensch-Maschine-Dialog so „natürlich" wie möglich zu gestalten, wird die Benutzerschnittstelle personifiziert, einfacher gesagt: Sie präsentiert sich als Dialogpartner „Smartakus". Realisiert wird er als Software-Agent, also als ein Programm, das selbstständig innerhalb des Systems agiert und über eine rudimentäre Intelligenz verfügt. Smartakus versteht, was man ihm sagt, kann sogar fehlerhafte oder unvollständige Eingaben sinnvoll interpretieren oder gegebenenfalls nachfragen, um so die Absichten des Nutzers zu erschließen.

Das Eingangsbeispiel könnte dann wie folgt ablaufen:

Smartakus: „Bitte, womit kann ich Ihnen dienen?"
Reisender: „Ich muss heute Mittag nach München, wann fährt der nächste Zug?"
Smartakus: „Sie möchten zwischen 11:00 und 13:00 Uhr nach München-Hauptbahnhof fahren?"
Reisender: „Ja, richtig."
Smartakus: „Es bestehen folgende Verbindungen: Mit dem Intercity ..."

Das System erkennt und interpretiert die Eingabe „Mittag" und unterstellt zunächst, dass mit der Ortsangabe der Hauptbahnhof in München gemeint ist. Mit seiner Gegenfrage vergewissert es sich, ob es richtig verstanden hat, ansonsten kann der Benutzer korrigieren. Das muss auch dann funktionieren, wenn er die Äußerungen von Smartakus ungeduldig unterbricht. Der Kommunikationsassistent muss sich dazu auf Benutzer und seine Gesprächsdomäne individuell einstellen.

Des Menschen bester Freund ist sein Handy

Um zusätzlich Gestik und Mimik als Informationsquellen zu verwerten, verfügt das System über eine Infrarot- und eine Videokamera nebst grafischer Bildverarbeitung. Analysiert der Rechner das akustische Signal synchron zu den optischen Daten, kann er Mehrdeutigkeiten einer sprachlichen Äußerung oftmals schon erheblich reduzieren. Umgekehrt vermag er aber auch eine mehrdeutige Geste oder einen zweideutigen Gesichtsausdruck anhand der gesprochenen Information zu interpretieren.

Die Gesamtaufgabe ist beliebig komplex: Die meist unbewusst eingesetzte Mimik oder ein emotionaler Ausdruck in der Sprache tragen ja im realen Dialog zwischen Menschen Information und verändern den Diskurs. Das gilt ebenso für real-manipulative Aktionen wie das physische Einbringen eines Dokumentes. Deshalb müssen zunächst Merkmale definiert werden, die es ermöglichen, Gestik, Mimik und sprachliche Emotionen zu erkennen und zu interpretieren. Das sind bei der Mimik Kontraste im Videobild, insbesondere in der Mundpartie, die mit Aufnahmen verglichen werden, um zwischen einem zustimmenden, einem neutralen und einem ablehnenden Gesichtsausdruck zu unterscheiden.

Fürs Erste suchen die Wissenschaftler der beteiligten zwölf Projektpartner die Anforderungen zu vereinfachen, indem sie sich auf die Entwicklung von Analysatoren für die einzelnen Eingabemodalitäten – Sprache, Gestik, Mimik – konzentrieren, und zwar ohne ihre Wechselwirkung zu berücksichtigen. Das folgt erst im Entwicklungsschritt.

Die Ergebnisse dieses Projekts sollen nicht nur Reisenden etwa auf Bahnhöfen oder in Flughäfen zugute kommen, sondern auch dem Benutzer intelligenter Haustechnik und Mobilkommunikation. Deshalb werden Internetzugang, GPS-Ortungs- und Navigationssysteme zur Ausstattung gehören. „In ferner Zukunft", so fabuliert Wolfgang Wahlster, „wenn der Computer gelernt hat, Ironie, Sarkasmus, Zustimmung und Ablehnung, Lob und Tadel zu unterscheiden, wird er so menschliche Züge bekommen, dass wir uns mit ihm wie mit einem Menschen unterhalten können." Dass das schon im Kleinen funktioniert, zeigt das japanische sprachgesteuerte Roboterhündchen Aibo, entwickelt von Sony. Er gehorcht auf Kommando, spielt Fußball, versteht dank eines SmartKom-basierten Computerbausteins Deutsch und reagiert auf Streicheleinheiten. Ob es eines Tages Fahrstuhltüren geben wird, die – wie der englische Science-Fiction-Autor Douglas Adams ironisch schilderte – dem Benutzer freudig für die Möglichkeit der Pflichterfüllung danken, sei dahingestellt. Das Ziel von Wolfgang Wahlster aber werden viele unterstreichen: Technik auch ohne Expertenwissen bedienbar machen. ■

Die promovierte Physikerin ***Christine Ritschel*** *hat nach langjähriger Forschungsarbeit Public Relations und Marketing studiert. Sie arbeitet als freie PR-Beraterin und Wissenschaftsjournalistin in Saarbrücken.*



Am Rande

Neue Dienstleistung: das Gedächtnis-Outsourcing

Erfindungen, die die Menschheit braucht: der Memo-Clip

Als Zivildienstleistender in einer psychiatrischen Einrichtung betreute ich vor etlichen Jahren eine Frau, deren Merkfähigkeit durch eine Krankheit eingeschränkt war: Sie kannte die Namen aller Verwandten und Bekannten aus früheren Tagen, tat sich aber schwer mit aktuellen Informationen. Also zog sie bei den entsprechenden Gelegenheiten Täfelchen aus der Tasche, auf der ihr Name vermerkt war und der ihrer Klinik, bei anderen „Habe ich Ihnen schon die Fotos meiner Familie gezeigt?“ „Ja, haben Sie (schon tausendmal).“ „Und wer sind Sie?“ Erfreulicherweise lernte ihr Gehirn mit der Zeit doch, die eine oder andere Gedächtnisfunktion wieder zu installieren, und besagte Patientin fand sich schließlich sogar allein in der Stadt zurecht.



Dieser Anstrengung müsste sie sich nicht mehr unterziehen, wenn eine Erfindung der Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe Produkt wird. In jener wunderbaren Zukunft, in der wir von einer Armee an Computern umgeben sind, die beispielsweise Kühlschränke zierend, am Gürtel hängend, in der Schuhsohle eingelassen oder aus dem Armaturenbrett blinkend nur darauf warten, uns das Leben zu erleichtern, in jener schönen neuen Welt übernehmen Memo-Clips die lästige Arbeit des Erinnerns. Sie sind mit allen anderen Maschinen und zusätzlichen Assistenten vernetzt, wissen alles über uns, erraten unsere Absichten und fungieren als elektronischer Post-it und Einkaufszettel.

Wie würde Eugen Roth wohl darüber denken?

Ein Mensch, der flott dem Ausgang naht,
naht auch dem Clip, der stets parat,
vom Server, der ja alles weiß,
erfährt, „Da draußen ist es heiß“.

Und weil der Mensch, das ist fixiert,
die Sonn’ allergisch nur pariert,
mahnt ihn sein Clip kurz vor der Tür:
„Geh bloß nicht ohne Kapp’ von hier!“

Der Mensch, dem solches widerfährt,
denkt: „Ist das Leben nicht was wert?“
Und wohl behütet knipst er dann
sein Hirn aus und den Rechner an.

Ihr
Klaus-Dieter Linsmeier

TECHNOGRAMM

TAUCHEN

Entspannter Atmen

Wer Stunden unter Wasser zubringt – bei Berufstauchern keine Seltenheit – und dabei Luft über ein Mundstück aus der Flasche atmet, der leidet oft an Zahnschmerzen, müder Kaumuskulatur oder schmerzendem Kiefergelenk. Die Folgen reichen von Kopfschmerzen bis hin zu Sehstörungen und Tinnitus. Standardmundstücke bieten dem Taucher nämlich nur zwei recht kurze, dafür dicke Beißflächen, um es festzuhalten. Die Druckbelastung wird nur bis zum vorderen Backenzahn verteilt, der Unterkiefer gerät in eine unphysiologische Haltung. Den Empfehlungen von Zahnärzten und Zahntechnikern folgend kommt nun ein anatomisch vorgeformtes Mundstück auf den Markt, dessen Haftfläche von den Eckzähnen bis zu den hinteren Backenzähnen reicht. Es ist zudem nur so dick, dass die Kiefer in einer normalen Ruheposition bleiben. Das Material, ein thermoplastisches Copolymer, lässt sich durch Erwärmen dem individuellen Gebiss des Tauchers anpassen.
Getestet wurde das Mundstück unter anderen von dem Begleitteam des Weltmeisters im Apnoe-Tauchen, Umberto Pelizzari. Bis in eine Tiefe von 135 Metern und Taucheinsätzen von bis zu 160 Minuten wurde es zwei Jahre lang getestet. In mehr als 300 Einsätzen blieben die beschriebenen Symptome aus; zudem wiesen die Mundstücke keine Risse oder Brüche auf, vermutlich auf Grund der geringeren aufzuwendenden Haltekraft. Weitere Forschungen sollen klären, ob auch die bei Berufstauchern hohe Kariesanfälligkeit reduziert wird.


JAXEUROPE GMBH

Beißschiene für Vieltaucher

SPRENGSTOFFE

Es (f)liegt was in der Luft

Fluggäste könnten beim Einchecken unbemerkt auf Sprengstoff kontrolliert werden. Ein vom amerikanischen Oak Ridge National Laboratory und der britischen Firma Mass Spec Analytical entwickelter Detektor bläst Luft über ihr Flugticket und analysiert anhaftende Partikel mit einem Massenspektrometer. Wer zuvor mit Sprengstoff hantiert hat, verrät sich laut Herstellerangaben, selbst wenn er dabei Schutzkleidung trug. Das System untersucht bereits tausend Tickets pro Stunde.

Energietechnik: TiNOX

Dünne Schichten auf Sonnenfang

Ein dunkler Wasserschlauch in der prallen Sommersonne liefert heißes Wasser – wer gärtnert, kennt das Prinzip der Solarthermie. Viele Hausbesitzer nutzen es zur Warmwasserbereitung. Vor allem bei trübem Wetter muss eine solche Anlage beweisen, dass sie effizient arbeitet. Eine besonders hohe Ausbeute liefern Kollektoren mit so genannten selektiven Absorbern. Sie absorbieren über möglichst das gesamte Sonnenspektrum Energie, strahlen aber anschließend nur einen Bruchteil davon als Verlustwärme wieder ab.

Die Münchener Firma Tinox brachte 1995 die ersten Dünnschichtabsorber auf Titan-Basis auf den Markt; sie setzen 95 Prozent der aufgefangenen Energie in Wärme um. Die Basis stellt meist eine Trägerfolie aus Kupfer, das Wärme gut leitet, Korrosion widersteht und sich leicht mit den wasserdurchflossenen Rohren verschweißen lässt. Um Lichtreflexionen zu mindern, wird die Kupferfolie – ähnlich Brillengläsern – durch Aufbringen dünner Schichten entspiegelt. Dafür eignen sich Metallverbindungen, etwa Oxide, die Licht wesentlich schwächer reflektieren als Metalle.

Tinox steht für Titan-Nitrit-Oxid, eine Mischung aus Titan-Nitriten und Titan-Oxiden. Eine hauchdünne Quarzschicht, die das Ganze schützend abschließt, hilft, den kleinen Anteil diffus reflektierten Lichts ebenfalls einzufangen – es wird in den Kollektor zurückgeworfen. Dieser gesamte Aufbau gibt dreimal weniger Wärmestrahlung im Infraroten wieder ab als die bisher verwendeten galvanischen Schichten.

Grüner Punkt für Tinox?

Unabhängige Institute wie das Fraunhofer Institut für Solare Systeme (ISE) in Freiburg und das Swedish International Testing and Research Institute in Borås haben die Alterung der blau schimmernden Titan-Absorber getestet: Auch nach 25 Jahren fällt der Wirkungsgrad nicht merklich ab. Ein Quadratmeter Tinox-Absorber liefert im Jahr in Mitteleuropa über 500 Kilowattstunden, hochgerechnet auf die 25 Jahre vermeidet er etwa vier Tonnen CO_2-Emissionen.

Auch die Herstellung ist besonders umweltfreundlich. Herkömmliche Absorber sind meist Bleche, die galvanisch mit Schwarzchrom oder Schwarznickel beschichtet werden; dabei entstehen mit Schwermetallen belastete Abwässer. Die Tinox-Schichten jedoch werden ohne anfallende Emissionen und mit einem geringen Energieaufwand von nur etwa einer Kilowattstunde pro Quadratmeter im Vakuum aufgedampft (PVD, *physical vapour deposition*). Rollen von Kupferfolie laufen dabei durch eine mehrere Kubikmeter große Hochvakuumkammer.

Dort verdampft eine Elektronenstrahlkanone Titan, das dann mit geringen Spuren Sauerstoff und Stickstoff zu den gewünschten Metallverbindungen reagiert; diese kondensieren schließlich auf der Folie in einer säulenartigen Mikrostruktur. Durch unterschiedliche Abspulgeschwindigkeiten und Verdampfungsraten lassen sich Struktur und Dicke der Beschichtung variieren, was letztlich die optischen Eigenschaften und die Farbwirkung bestimmt. Wem das tiefe Blau der Absorber nicht gefällt, der kann seine Hausfassade neuerdings mit einem gold-bronzefarben schimmernden Sonnenfänger schmücken. Dieser ist sogar günstiger in der Herstellung, hat aber leider einen etwas niedrigeren Absorptionskoeffizienten.

Wie Kollektoren noch weiter zu verbessern sind, untersuchten die Münchener Dünnschichtexperten zusammen mit der Forschungsgruppe Solarenergie der Universität Marburg. Für das Zusammenspiel von Absorber und Wärme ableitendem Rohr gilt: Je dünner die Kupferfolie ist, desto geringer sind die Verluste durch thermische Abstrahlung, des-

Eine Kollektoranlage besteht aus den Wasser führenden Kupferrohren (im Bild sind die Schweißnähte als rippenartige Struktur erkennbar) und der darüber liegenden Absorberfolie.



WWT TECHNISCHER GERÄTEBAU / THEILACKER-BECK



ZAE BAYERN

Gemeinsam mit dem Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung in Garching bei München und der Universität Muscat in Oman baute das Unternehmen diese solarthermisch betriebene Pilotanlage zur Meerwasserentsalzung. Korrosionsfest und lebensmittelecht dienen kühle Tinox-Flächen hier zudem als Kondensationsfläche für Wasserdampf.

Das Unternehmen im Profil

Der promovierte Physiker Miladin Lazarov entwickelte die Titan-Nitrit-Oxid-Beschichtung im Rahmen seiner Promotion an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Er gründete 1994 zusammen mit drei Kollegen die TiNOX GmbH, um Absorber im industriellen Maßstab herzustellen. Mit Erfolg: Die Firma gewann im Jahr 1998 den Umweltinnovationspreis des Bayerischen Wirtschaftsministeriums und nahm als „Weltweites Projekt“ an der Expo 2000 teil. Heute beschäftigt der Betrieb rund fünfzig Mitarbeiter und beliefert als Marktführer Kollektorenhersteller in Deutschland und Europa: Sechzig Prozent aller neu installierten Kollektoren nutzen Tinox-Absorber. Für 2002 peilt das Unternehmen einen Jahresumsatz von 15 Millionen Euro an. Die Tochterfirma ScolMed entwickelt und vermarktet medizinische Titan-Beschichtungen für Langzeitimplantate.

Weitere Informationen unter
www.tinox.com

to schwieriger wird es aber auch, sie dauerhaft an die Wasser führenden Kupferrohre zu schweißen. Als wirtschaftliches Optimum erwies sich ein 120 Mikrometer starkes Blech. Ein Kilogramm Kupfer und je ein Gramm Titan und Quarz genügen dann für einen Quadratmeter Absorber, der am Ende seiner Betriebsdauer sogar ohne Vorbehandlung recycelt werden kann.

Wegen ihrer hohen Effizienz können die selektiven Solar-Absorber nicht nur Heiz- und Brauchwasser erwärmen, sondern auch industrielle Prozesse antreiben, Meerwasser entsalzen oder sogar zur Kühlung dienen: Indem das Kühlmittel verdunstet, entzieht es seiner Umgebung Wärme; der Kühlmittelkreislauf lässt sich mit solarerhitztem Wasser antreiben. Noch gibt es weltweit nur wenige „Solar-Cooling“-Anlagen, zum Beispiel eine industriell genutzte Klimaanlage in Mexiko mit 600 Quadratmetern Tinox-Kollektoren. Der Vorteil dieser Technik liegt auf der Hand: Erfordert die Sonneneinstrahlung Kühlung, steht auch die Energie dazu bereit.

Dörte Otten

Die Autorin ist promovierte Biophysikerin und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin und Fachlektorin in München.

Spektrum der Wissenschaft
Zum Erfolg mit Online@dressen

➤ **BASF**
Chemikalien, Kunststoffe und Fasern, Veredlungsprodukte, Pflanzenschutz und Ernährung, Öl und Gas
www.basf.de

➤ **Corporate Quality Akademie**
MM – Themen per Fernlehre
Qualitätsmanagerlehrgänge
QM im Gesundheitswesen
www.cqa.de

➤ **DRAG**
Deutsche Renault AG
www.renault.de

➤ **Forschungszentrum Jülich Brennstoffzellen**
Technologie, Jobs, Dissertationen, Diplomarbeiten
www.fuelcells.de/jobs

➤ **Forum MedizinTechnik und Pharma in Bayern e.V.**
Innovationen für die Medizin
www.forum-medtech-pharma.de

➤ **Spektrum Akademischer Verlag**
www.spektrum-verlag.com

➤ **Sterne und Weltraum Verlag**
www.mpia-hd.mpg.de/suw/suw

➤ **Verlag Harri Deutsch**
Mathematik, Natur- und Ingenieurwissenschaften
www.harri-deutsch.de/verlag

➤ **Wissenschaft Online GmbH**
Wir machen Wissenschaft transparent!
www.wissenschaft-online.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 80,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag bestehend aus einer Branchenzeile, Firmenname und WWW-Adresse. Zusätzlich erscheint Ihre Anzeige als Link-Eintrag auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft.

Informationen erhalten Sie direkt von
GWP media-marketing
Anzeigenverkauf Spektrum der Wissenschaft • Mareike Grigo
Telefon (02 11) 887-23 94 • Telefax (02 11) 887-23 99
E-Mail: m.grigo@vhb.de

Mit der Veröffentlichung Ihrer WWW-Adresse im Heft und im Internetangebot von Spektrum der Wissenschaft erreichen Sie eine gehobene Zielgruppe und erzielen für Ihre Online-Kommunikation hohe Aufmerksamkeitswerte.

www.spektrum.de
Ihre Anlaufstelle für Wissenschaft im Internet

Report: Der Offene Himmel

Wie sich die Gegner von einst in die Karten schauen

Zwischen Vancouver und Wladiwostok ist nun der Luftraum freigegeben für kooperative Beobachtungsflüge: 29 Staaten dürfen sich gegenseitig kontrollieren und uneingeschränkt militärische Anlagen aus der Luft fotografieren. Damit sorgen sie für Transparenz und bauen Vertrauen auf.



ANBW, ASTRID KLÖCKNER

VERTRAUENSBILDENDE MASSNAHMEN

Stabilisieren statt Spionieren

Einst undenkbar, doch heute Realität: Der „Vertrag über den Offenen Himmel" ist eine Errungenschaft, die der fragilen sicherheitspolitischen Lage eine neue Stabilität verleiht.

Von Uwe Reichert

Als der US-Pilot Francis Gary Powers am 1. Mai 1960 sein Aufklärungsflugzeug bestieg, wusste er noch nicht, dass er an diesem Tag Weltgeschichte schreiben würde. Sein Auftrag war streng geheim: Auf einer Flugroute quer über die Sowjetunion sollte er militärische Nuklearanlagen fotografieren. Die USA wollten sich auf diese Weise über den Stand der sowjetischen Atomrüstung informieren. Von besonderem Interesse war eine Region östlich des Urals, wo sich verschiedene Produktionsanlagen befanden. Auch sollte sich Gerüchten zufolge in jener Gegend ein Unfall ereignet haben, bei dem offenbar große Mengen radioaktiven Materials weiträumig verteilt worden waren.

Powers flog in einer Höhe von über 18 Kilometern. Damit würde sich seine Maschine vom Typ U2 zwar auf den Radarschirmen der sowjetischen Abwehr bemerkbar machen, sie wäre aber aller Erfahrung nach von Abfangjägern und Flugabwehrraketen nicht zu erreichen. Dennoch: In der Nähe von Swerdlowsk, dem heutigen Jekaterinburg, wurde das Höhenflugzeug von einer Rakete getroffen. Powers vermochte sich mit dem Fallschirm zu retten. Er hatte strenge Anweisung, sich nicht ergreifen zu lassen, doch von der eigens mitgeführten Giftkapsel machte er – aus welchen Gründen auch immer – keinen Gebrauch.

So konnte der sowjetische Regierungschef Nikita Chruschtschow voller Empörung der Weltöffentlichkeit einen gefangenen US-Piloten präsentieren, der den Luftraum der Sowjetunion verletzt hatte. Nach anfänglichen Dementis musste US-Präsident Dwight D. Eisenhower schließlich eingestehen, dass seit 1955 mehrere solcher Spionageflüge stattgefunden hatten. Dieses späte Eingeständnis nahm Chruschtschow zum Anlass, die amerikanisch-sowjetische Gipfelkonferenz in Paris abzubrechen, auf der die Deutschlandfrage erörtert werden sollte. Das ohnehin gespannte Verhältnis zwischen den USA und der Sowjetunion verschlechterte sich dramatisch. Ein Jahr nach diesem U2-Zwischenfall spitzte sich die Lage durch den Bau der Berliner Mauer zu. Wenige Monate, bevor der Ost-West-Konflikt mit der Kuba-Krise 1962 einem weiteren Höhepunkt entgegensteuerte, erlangte Powers seine Freiheit wieder: Auf der Glienicker Brücke bei Potsdam wurde er in einem von den Geheimdiensten sorgfältig arrangierten Verfahren gegen den Spion Rudolf Abel ausgetauscht, der Ende der 50er Jahre versucht hatte, in New York ein sowjetisches Agentennetz aufzubauen.

Von derlei Geheimdienst-Atmosphäre ist im April 2002 auf dem Marineflugplatz Nordholz bei Cuxhaven nichts mehr zu spüren. Rund zweihundert Offiziere aus Deutschland, Russland, Weißrussland, Ungarn, der Ukraine, den USA und anderen Ländern unterziehen hier drei Antonow-Propellermaschinen einer so genannten Zulassungsprüfung. Die Beobachtungsflugzeuge, die mit großformatigen Panorama- und Einzelbildkameras ausgerüstet sind, sollen im Prinzip das Gleiche tun wie Powers' U2 mehr als vier Jahrzehnte zuvor: die Territorien der ehemals gegnerischen Staaten überfliegen und militärische Einrichtungen fotografieren. Das Anliegen ist ebenfalls das Gleiche: Man möchte wissen, über welche militärischen Potenziale die jeweils anderen Länder verfügen.

Doch gibt es erhebliche Unterschiede zur eingangs beschriebenen Situation in der Hoch-Zeit des Kalten Krieges. Hier handelt es sich nicht um Spionage, son-



UWE REICHERT

Fliegen für den Frieden: Diese ukrainische Antonow-30 dient vertrauensbildenden Maßnahmen.

dern um kooperativ durchgeführte Beobachtungsflüge. Die dabei gewonnenen Informationen stehen allen teilnehmenden Nationen zur Verfügung. Kooperation und Informationsaustausch haben Konfrontation und Misstrauen ersetzt. Alle Offiziere hier wissen, dass sie an einem neuen Kapitel der Weltgeschichte mitwirken. Aber anders als in den Krisen der vergangenen Jahrzehnte schaut die Weltöffentlichkeit kaum hin. Dabei sind die positiven Folgen der politischen Umwälzungen in Europa nach dem Fall der Mauer gegenwärtig wohl nirgends konkreter zu spüren als hier in Nordholz. Fernab der Parlamente, wo Politiker wohlklingende Sonntagsreden halten, bauen Menschen, die einst auf verschiedenen Seiten des „Eisernen Vorhangs" standen, am gemeinsamen Haus Europa und erproben eine neue transatlantische beziehungsweise transpazifische Zusammenarbeit. Was hier geschieht, ist praktizierte Sicherheitspartnerschaft – über alle früheren geografischen und ideologischen Grenzen hinweg.

Möglich geworden ist diese neue Art der Kooperation durch den so genannten „Vertrag über den Offenen Himmel". Die Idee zu einem solchen *Open Skies Trea-*

Der Vertrag über den Offenen Himmel

Die wichtigsten Fakten:

➤ Am 24. März 1992 unterzeichneten die 16 Nato-Staaten, die drei GUS-Staaten Russland, Weißrussland und Ukraine sowie Polen, die damalige Tschechoslowakei, Rumänien, Bulgarien, Ungarn und Georgien den Vertrag. Als weitere Mitglieder folgten Kirgistan, Schweden und Finnland.

➤ Der Vertrag ist auf unbegrenzte Zeit geschlossen und steht weiteren Staaten zum Beitritt offen.

➤ In Kraft ist das Abkommen seit 1. Januar 2002.

➤ Der Vertrag öffnet den Luftraum aller Vertragsstaaten auf kooperativer Grundlage. Die Territorien können ohne Einschränkungen von speziell ausgerüsteten und zugelassenen Flugzeugen aus beobachtet werden.

➤ Abhängig von seiner Größe muss jeder Vertragsstaat eine bestimmte Anzahl von Beobachtungsflügen über seinem Territorium erdulden (passive Quote). Im Gegenzug steht ihm die gleiche Anzahl von Beobachtungsflügen über fremden Territorien zu (aktive Quote).

➤ Der Einsatz der Beobachtungsflugzeuge ist ausdrücklich auch für Zwecke des Umweltschutzes und zur Bewältigung von Naturkatastrophen erlaubt.

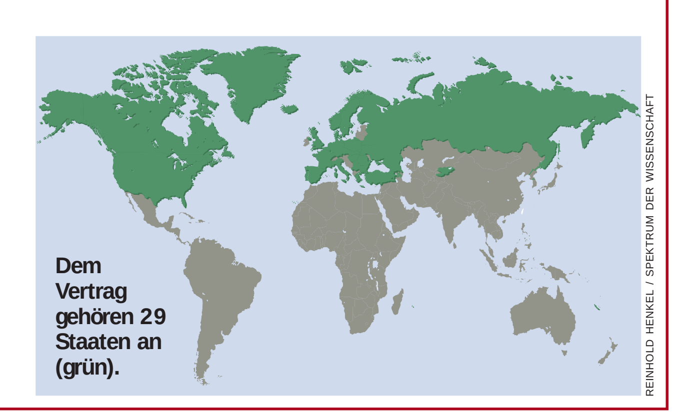
Die wichtigsten Wirkungen:

➤ Der Vertrag verbessert die militärische Offenheit und Transparenz und trägt im Verbund mit anderen Verifikationsmaßnahmen dazu bei, die Einhaltung bestehender und künftiger Rüstungskontrollabkommen zu überwachen. Dadurch hilft er, Vertrauen aufzubauen, Konflikte zu verhüten und Krisen zu bewältigen.

➤ Als vertrauens- und sicherheitsbildende Maßnahme trägt der Vertrag zur Weiterentwicklung und Stärkung des Friedens bei, wodurch auch Stabilität und kooperative Sicherheit der Vertragsmitglieder erreicht wird.

➤ Durch das weit über Europa hinausreichende Vertragsgebiet setzt das Abkommen neue Maßstäbe.

➤ Der Vertrag hat Modellcharakter für Krisengebiete in Afrika und Asien.



Dem Vertrag gehören 29 Staaten an (grün).

REINHOLD HENKEL / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



„Rüstungskontrolle, die in die Zukunft führt“

Spektrum-Interview mit Oberst i.G. Ernst Britting, der auf deutscher Seite dafür zuständig ist, die Regelungen des Vertrages in die Praxis umzusetzen

Spektrum der Wissenschaft: *Herr Oberst Britting, Sie setzen mit Ihrem Team und Ihren ausländischen Partnern heute das um, was die Diplomaten vor zehn Jahren in den Vertrag über den Offenen Himmel hineingeschrieben haben. Welche Erfahrungen haben Sie in der bisherigen Praxis gewonnen?*

Britting: Seit 1993 haben wir schon mehr als 400 Beobachtungsflüge als Test durchgeführt. Wir konnten dabei alle wesentlichen organisatorischen und technischen Fragen klären, und wir haben uns auf gemeinsame Standards für die Zertifizierung der Flugzeuge geeinigt – was sehr schwierig war. Des Weiteren haben wir Ausbildungsunterstützung zum Beispiel in den baltischen Staaten geleistet, und unsere Flugzeuge waren zur Krisennachsorge in Bosnien-Herzegowina und auch bei Umweltkatastrophen im Einsatz. Unsere Erfahrungen zeigen, dass die Beobachtungsflüge die Erwartungen erfüllen, die der Vertrag in sie setzt – als sicherheits- und vertrauensbildende Maßnahme, als Verifikationsmittel, als Mittel zur Krisenprävention und auch als Hilfe für die Bewältigung von Naturkatastrophen.

Spektrum: *Sie arbeiten mit Teams aus 29 Nationen. Wie gut funktioniert das?*

Britting: Bei uns sind alle Nationen gleichberechtigt. Deshalb sind wir ein Team. Wir kennen uns alle seit vielen Jahren und arbeiten gut zusammen. Es ist schön zu sehen, dass hier keiner dominiert. Es zählen nur Fachkompetenz und Sachargumente. Der Geist des Vertrages wird bei uns in der täglichen Praxis erlebbar. Auch das schafft Vertrauen. Das Besondere am Offenen Himmel ist, dass sich nicht zwei gegnerische Inspektionsmannschaften am Boden gegenüberstehen, sondern dass wir uns die Beobachtungsflüge gemeinsam als Missionsteam erarbeiten. Im Flugzeug gibt es nur eine Mannschaft und nicht zwei. Deswegen haben wir verglichen mit anderen Verifikationsregimes eine eigene Kultur der Zusammenarbeit.

Spektrum: *Wie machen sich die unterschiedlichen Mentalitäten bemerkbar, die bis zum Fall der Mauer vorherrschten?*

Britting: Durch das persönliche Miteinander versteht man viel besser, welche Erlebnisse und Einstellungen in der Geschichte eine Rolle spielten, und man lernt daraus einiges, was das für die Zukunft bedeutet und was man für die Zukunft berücksichtigen müsste – für die Rüstungskontrolle und für den weiteren Ausbau des europäischen Gedankens. Man muss sich ja immer wieder die Frage stellen: Wie denken die anderen? Was ist deren Einstellung?

Spektrum: *Was heißt das konkret für den Offenen Himmel?*

Britting: Wir können daraus zum Beispiel ersehen, dass der Vertrag auch noch in zehn Jahren und darüber hinaus seine Bedeutung behalten wird, selbst wenn sich die politischen Rahmenbedingungen seit der Vertragsunterzeichnung etwas verschoben haben und sich womöglich auch künftig verschieben werden. Aber auch 2010, 2012 wird jeder der Vertragspartner sehen wollen, dass seine Nachbarn nichts zu verbergen haben. Da wirkt einfach noch die Historie nach.



ANBW, ASTRID KLÖCKNER

Oberst i.G. Ernst Britting

Spektrum: *Inwiefern?*

Britting: Da ist zunächst einmal das unterschiedliche Bedürfnis nach Geheimhaltung. Für die Russen beziehungsweise die Sowjets war das von entscheidender Bedeutung für ihre Auffassung von nationaler Sicherheit. Deshalb ist in den Vertrag so manches Detail hineingekommen, was man künftig vielleicht modifizieren wird. Wenn man – bildlich gesprochen – beim Nachbarn über den Gartenzaun schauen möchte, um sich davon zu überzeugen, dass bei ihm alles in Ordnung ist, dann muss man wissen: In Russland gibt es keine Jägerzäune mit Latten, durch die man durchsehen kann wie bei uns, sondern Bretterverschläge, zwei Meter hoch oder höher, damit man ja nicht sieht, was sich dahinter verbirgt. Hier gibt es also noch viel Informationsbedarf für die ehemals westliche Seite.

Spektrum: *Und umgekehrt?*

Britting: Für unsere östlichen Vertragspartner ist der Offene Himmel vielleicht sogar noch wichtiger. Wir dürfen nicht übersehen, dass es bei uns in Europa – und ich meine ganz Europa, und nicht nur Westeuropa, wie es oft verstanden wird – noch Generationen dauern wird, bis die Wunden der beiden Weltkriege des letzten Jahrhunderts vernarbt sein werden. Der deutsche Überfall auf die



UWE REICHERT

Symbol multinationaler Zusammenarbeit: freundlicher Willkommensgruß für das Inspektorenteam, das die ersten Beobachtungsflugzeuge einer Zulassungsprüfung unterzieht.

Sowjetunion 1941 ist in Russland noch in allen Köpfen präsent, wie ich es selbst anlässlich einer Testbeobachtung in Moskau erlebt habe. Auch unsere westeuropäischen Nachbarn haben mit uns Deutschen und unserer Geschichte noch so ihre Probleme. Es ist also noch auf lange Zeit wichtig, die jetzige Balance auf dem hohen Stabilitätsniveau, das wir erreicht haben, zu halten und weiter auszutarieren. Dazu gehört auch, sie durch solche vertrauensbildenden Maßnahmen zu pflegen, wie sie der Offene Himmel bietet. Das macht innereuropäisch ganz viel Sinn.

Spektrum: *Nun gibt es ja, wie der Krieg auf dem Balkan gezeigt hat, auch aktuellere Konfliktherde. Was kann der Offene Himmel hier tun?*

Britting: Unsere Flugzeuge haben sich bereits an der Krisennachsorge beteiligt, indem sie über Bosnien-Herzegowina im Einsatz waren. Künftig wird vielleicht der größte Teil der Beobachtungsflüge der Krisenprävention dienen. Hier hat der Offene Himmel wirklich auch Modellcharakter für Konfliktregionen außerhalb des jetzigen Vertragsgebietes. Sicherheits- und vertrauensbildende Maßnahmen könnten auch andernorts zu einer Beruhigung beitragen – beispielsweise im Kaukasus, in Zentralasien, im Konflikt zwischen Indien und Pakistan und auch in den Krisenregionen von Nordafrika bis in den Iran.

Spektrum: *Bei solchem Potenzial sollte man annehmen, dass weitere Staaten Interesse an dem Offenen Himmel haben.*

Britting: Ja, in der Tat. Schweden und Finnland sind ja schon nachträglich beigetreten. Und so mancher Staat aus dem asiatischen Raum verfolgt unsere Erfahrungen mit großem Interesse.

Spektrum: *Und die Europäische Union? Sie hatten ja besonders die Bedeutung für Europa hervorgehoben.*

Britting: Kürzlich war eine Europa-Parlamentarierin hier. Sie hat erkannt, welche europäische Dimension eigentlich in der Rüstungskontrolle steckt – und dass man sich auch auf EU-Ebene mal damit befassen sollte. Das ist bisher kaum der Fall. In der EU-Politik gibt es da gewiss viel Nachholbedarf. Wir hier sind nur die Militärhandwerker. Wir versuchen, was Konkretes zu machen, was uns in die Zukunft bringt und was wirklich dazu beiträgt, dass Konfrontationen abgebaut werden beziehungsweise sich nicht wieder entwickeln.

Das Interview führte
Uwe Reichert



Großformatige Kameras im Boden der Beobachtungsflugzeuge erfassen das überflogene Terrain.

ANBW, ASTRID KLÖCKNER

ty, wie er im Englischen genannt wird, ist bereits ein halbes Jahrhundert alt. Sie kam in dem Klima des Machtstrebens und Misstrauens zwischen den Vereinigten Staaten und der Sowjetunion auf, das sich in den Jahren nach dem Zweiten Weltkrieg immer weiter aufheizte. Weil den Militärstrategen meist keine verlässlichen Informationen über das Potenzial der jeweils anderen Seite vorlagen, insbesondere im Bereich der nuklearen Rüstung, waren sie zu konservativen Schätzungen gezwungen. Das heißt, in der Regel schrieben sie dem Gegner ein Potenzial zu, das größer sein sollte als das, worüber er tatsächlich verfügte – und das oft größer erschien als das eigene, denn mit einem Unterlegenheits-Szenario ließen sich die Haushaltsausschüsse viel leichter zur Finanzierung neuer Rüstungsprogramme überreden.

Um diese asymmetrische Informationslage aufzubrechen, die zu den bekannten Folgen des Wettrüstens führte, schlug Eisenhower im Juli 1955 während der Genfer Vier-Mächte-Konferenz vor, ein Regime des Offenen Himmels zu entwickeln: Unbewaffnete Flugzeuge der Sowjetunion und der USA sollten die Territorien der beiden Länder regelmäßig überfliegen. Damit sollten die tatsächlichen militärischen Fähigkeiten festgestellt, Veränderungen rechtzeitig erkannt und das Risiko von Fehleinschätzungen der sicherheitspolitischen Lage verringert werden. Die sowjetische Führung lehnte den amerikanischen Vorschlag ab mit der Begründung, dieses Vorhaben würde in erster Linie Spionagezwecken dienen. Daraufhin ordnete Eisenhower die geheimen Überflüge mit der U2 an, und beide Seiten bauten in der Folgezeit ihre kostenintensiven Systeme aus Aufklärungssatelliten auf.

Im Mai 1989, als sich der Ost-West-Konflikt merklich entspannt hatte, ergriff US-Präsident George Bush erneut die Initiative. Er schlug vor, ein Abkommen zu entwickeln, das hauptsächlich der Vertrauensbildung dient und den in der Konferenz über Sicherheit und Zusammenarbeit in Europa (KSZE) 1986 eingeleiteten Prozess fortsetzt und weiter ausbaut. Bereits im Januar 1990 absolvierte eine kanadische Hercules-Maschine einen Probeflug über Ungarn, der auch über einen sowjetischen Militärstützpunkt führte. Allerdings fand der Flug ohne Sensorausrüstung statt; er sollte lediglich demonstrieren, dass keine organisatorischen Probleme auftreten. Einen Monat später wurden konkrete Verhandlungen über einen Vertrag über den Offenen Himmel in Ottawa (Kanada) aufgenommen und danach in Budapest (Ungarn) fortgesetzt. Teilnehmer waren die Staaten der Nato und des damaligen Warschauer Pakts.

Spielregeln für das Spähen

Diese beiden ersten Verhandlungsrunden offenbarten eine Reihe von grundlegenden Differenzen. Ursächlich war vor allem das unterschiedliche Bedürfnis nach Geheimhaltung, die in der Sowjetunion einen viel höheren Stellenwert hatte als in den Nato-Staaten. Die Verhandlungen wurden zunächst abgebrochen, doch im Herbst 1991 kehrten die Delegationen an den Verhandlungstisch zurück – diesmal in Wien. Nach der Auflösung der Sowjetunion hatte für deren Nachfolgestaaten die Frage der Geheimhaltung erheblich an Bedeutung verloren, und es bildete sich eine kooperative Atmosphäre unter den Verhandlungspartnern aus. Zügig schritt der Verhandlungsprozess voran, und im März 1992 unterzeichneten die Außenminister von 25 Staaten das Vertragswerk. Es trat am 1. Januar 2002 in Kraft, nachdem auch Russland und Weißrussland ihre Ratifikationsurkunden hinterlegt hatten.

Der Vertrag über den Offenen Himmel enthält weitreichende Vereinbarungen zur Vertrauensbildung, die – gemessen an dem jahrzehntelang vorherrschenden Klima des Misstrauens und Wettrüstens – als geradezu sensationell einzustufen sind. Jeder Vertragsstaat darf über dem gesamten Hoheitsgebiet jedes anderen Teilnehmers Beobachtungsflüge durchführen. Nur deren jährliche Anzahl ist durch Quoten begrenzt. Die Sensorausstattung muss den Spezifikationen des Vertrags entsprechen, und sie muss zusammen mit den Beobachtungsflugzeugen in einem aufwendigen Prüfungsverfahren zugelassen werden. Um jedem Vertragsstaat gleiche Voraussetzungen zu bieten, müssen die Sensoren kommerziell erhältlich sein und die gewonnenen Daten und Informationen allen Partnern zur Verfügung gestellt werden.

Um des Weiteren allen Vertragspartnern genügend Zeit für das Anschaffen und Erproben der Sensorik zu bieten, wird diese in zwei Stufen eingeführt. In einer ersten Phase sind optische Kameras und Videokameras zugelassen. In einer zweiten Phase, die Anfang 2006 beginnt, dürfen auch Infrarot-Zeilenabtastgeräte und Radargeräte eingesetzt werden. Das so genannte Bodenauflösungsvermögen, das diese Sensoren erreichen, darf bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten. Für die optischen Kameras ist die Bodenauflösung auf dreißig Zentimeter begrenzt, für die Infrarot-Kameras auf fünfzig Zentimeter und für die Radargeräte auf drei Meter. Diese Werte sind für die Zwecke des Vertrages ausreichend. Ein höheres Auflösungsvermögen würde Einzelheiten preisgeben, die für die Vertragserfüllung irrelevant sind, die der beobachtete Staat aber eventuell weiterhin geheim halten möchte.

Die Begrenzung des Bodenauflösungsvermögens macht es erforderlich, dass ein Beobachtungsflugzeug mit gegebener Sensorik eine bestimmte Mindestflughöhe nicht unterschreitet. Eine der wichtigsten Aufgaben der Zulassungsprüfung ist deshalb, diese Mindestflughöhen festzulegen. Dazu wird ein spezielles Kalibrierungsziel aus unterschiedlichen Höhen fotografiert. Aber auch die verwendeten Filme und der Entwicklungsprozess spielen eine erhebliche Rolle. Denn welche Details auf dem Negativ zu erkennen sind, hängt wesentlich von der Kontrastwiedergabe der Grauwertabstufungen ab. Diese lässt sich durch die Steilheit der Schwärzungskurve beschreiben, die angibt, welche Schwärzung des Films durch eine bestimmte Belichtung hervorgerufen wird. Allein zwei Jahre dauerte es, bis die Inspektorenteams die „richtige“ Schwärzungskurve festgelegt hatten.



Mit Hilfe von Kalibrierungszielen werden die Mindestflughöhen ermittelt. Die Negative (links) dürfen keine Einzelheiten zeigen, die kleiner sind als dreißig Zentimeter. Der lange Pfeil markiert die Flugrichtung.

Solche Feinheiten zeigen, dass der Vertragstext nicht alle technischen oder operativen Fragen berücksichtigen konnte. Deshalb wurde nach Vertragsunterzeichnung eine „Beratungskommission Offener Himmel“ eingesetzt, in der die noch ungelösten Probleme oder die erst in der Praxis auftauchenden Fragen beraten werden können. Oftmals fehlen international anerkannte wissenschaftliche Messverfahren, die dann erst von Experten erarbeitet werden müssen. Die Kommission, die in Wien tagt, erarbeitet Lösungsvorschläge und beschließt über den bisherigen Vertragsinhalt hinausgehende Regelungen. Diese Beschlüsse haben die gleiche rechtliche Verbindlichkeit wie der Vertrag. ■

Uwe Reichert *ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.*

Literaturhinweis
Der Vertrag über den Offenen Himmel. Von Rüdiger Hartmann und Wolfgang Heydrich. Nomos, 2000.

UMSETZUNG DES VERTRAGES

Vertrauen und Flexibilität

Die praktische Ausgestaltung des Vertrages wirft noch manche Fragen auf. Sie belegt aber ebenso seinen Nutzen und verdeutlicht das Potenzial für die Vertrauensbildung auch außerhalb des bisherigen Vertragsgebietes.

Von Ernst Britting

Wenngleich von der Unterzeichnung des Vertrages über den Offenen Himmel bis zu seinem In-Kraft-Treten fast zehn Jahre vergingen, herrschte in dieser Zeit kein Stillstand. Die Mehrheit der Vertragsstaaten nutzte intensiv die Chance, das Regelwerk in der Praxis zu erproben. Bereits im Juli 1993 startete die erste deutsche Testbeobachtungsmission von Ulan-Ude in Sibirien aus. Bis der Vertrag schließlich tatsächlich in Kraft trat, hatten alle beteiligten Staaten immerhin 420 Testmissionen im gesamten Vertragsgebiet durchgeführt.

In den Jahren 2000 und 2001 trafen sich die Teams mehrerer Vertragsstaaten in Fürstenfeldbruck zu einer „probeweisen“ Zulassungsprüfung ihrer Beobachtungsflugzeuge und Sensorik. Zu dieser Testzertifizierung hatte das Zentrum für Verifikationsaufgaben der Bundeswehr in Geilenkirchen eingeladen, dem alle nationalen Aufgaben im Zusammenhang mit der Anwendung des Vertrages obliegen. Inspektoren überprüften die Beobachtungssysteme auf Vertragskonformität. Neben dem Erarbeiten einer er-

staunlichen Routine gelang es hierbei auch, sich auf gemeinsame methodische Standards zu verständigen, was bei der Heterogenität der multinational zusammengesetzten Gruppe kein leichtes Unterfangen war.

Von den dadurch erworbenen Erfahrungen im Umgang mit komplizierten internationalen Vertragsbestimmungen konnten auch Staaten profitieren, die dem Vertrag über den Offenen Himmel bisher nicht beigetreten sind. So unterstützten Offiziere des Zentrums für Verifikationsaufgaben die Ausbildung von Rüstungskontrollexperten zahlreicher anderer Nationen. Einer der Schwerpunkte war hierbei das Ausbildungszentrum für Rüstungskontrolle für die Balkanregion, das im Sommer 2000 in Zagreb eingerichtet worden war.

Einsätze der Krisennachsorge mit den Konfliktparteien in Bosnien-Herzegowina und Flüge bei Umweltkatastrophen bewiesen auch die Eignung des Vertrages für weiter gehende Aufgaben. So konnte etwa während des Hochwassers an der Oder im Sommer 1997 den Einsatzstäben in Brandenburg und Warschau nahezu verzugslos aktuelles Bildmaterial über den gesamten Flussverlauf zur Verfügung gestellt werden.

Der Vertrag tritt in zwei Phasen in Kraft, um den Nationen Zeit zu geben, geeignete Beobachtungsflugzeuge mit vertragskonformer Sensorik zu beschaffen. In beiden Phasen sind hierfür exakte Leistungsparameter festgelegt, deren Einhaltung bei der Zulassungsprüfung von allen Vertragsstaaten akzeptiert werden muss. Quotenflüge sind nur mit einem zertifizierten Beobachtungsflugzeug gestattet.

Mit dem „Taxi“ nach Russland

In der ersten Phase, der so genannten Ersten Fähigkeit, sind die Beobachtungsflugzeuge nur mit optischen Sensoren ausgestattet. Die ersten drei Flugzeuge dieser Art wurden im vergangenen April auf dem Marinefliegerhorst Nordholz bei Cuxhaven in einem aufwendigen Verfahren zertifiziert. Diese Maschinen gehören Ungarn, der Ukraine sowie Russland und Weißrussland, die sich beide im Sinne des Vertrages zu einer Staatengruppe zusammengetan haben. Die Vereinigten Staaten haben ihr Beobachtungsflugzeug im Mai auf der Wright-Patterson Air Force Base zertifizieren lassen. Bis Juli folgen die übrigen Staaten mit eigenen Maschinen. Ab August werden dann die ersten offiziellen Quotenflüge stattfinden.

Bis dahin sind unter dem Dach der Beratungskommission in Wien noch ▶

FÜR ALLE, DIE ES WIRKLICH WISSEN WOLLEN

COMPACT: VOM AFFEN ZUM MENSCHEN
TEIL II: EVOLUTION DES MENSCHEN

INHALT:
- die aktuelle Diskussion über die neuesten Funde
- die Forschungsgeschichte der letzten 150 Jahre
- skurrile Umstände, die Theorien beeinflusst haben
- die Vielfalt der Menschenvorfahren
- die geistigen Leistungen des Neandertalers
- die umstrittene Abstammung des modernen Menschen
- Sonderentwicklungen in Europa und in Ostasien
- Begegnung von Neandertaler und modernem Menschen
- Steinzeit-Industrien

Erstverkaufstag: 14.06.2002; € 8,90



Von den ersten aufrecht gehenden Vormenschen vor 6 Millionen Jahren bis zu den frühesten schriftlichen Zeugnissen historischer Zeit: Der französische Anthropologe Louis de Bonis beschreibt umfassend und anschaulich, mit reichem Bildmaterial, die wichtigsten Stadien der menschlichen Evolution und frühen Kulturentwicklung.

Mit diesem Sonderheft setzt der Autor Louis de Bonis seine lebendige Schilderung der Evolution des Menschen fort. In Teil I dieser Serie schreibt er von der Entstehung und Entfaltung der Primaten, der Blütezeit der Menschenaffen und den ersten Hominiden, von denen die Vormenschen abstammen.



Compact: Vom Affen zum Menschen Teil 1: Die Evolution der Primaten ist im Dezember 2001 erschienen und noch lieferbar; € 8,90.

WEITERE INFORMATIONEN FINDEN SIE IM INTERNET UNTER WWW.SPEKTRUM.DE ODER AUF DEN BESTELLKARTEN AUF DEN SEITEN 117/118.





ANBW, ASTRID KLÖCKNER

Lagebesprechung der Bildauswerter: Trotz unterschiedlicher Uniformen bilden die Inspektoren ein einheitliches Team.

technische Fragen beziehungsweise kleinere Probleme zu lösen. Hierunter fallen vergleichsweise einfache Anliegen wie die der Kostenstandards, die seit ihrer Festlegung 1992 nicht mehr an die aktuelle Preisentwicklung angepasst wurden. Etwas schwieriger dürfte dies in Bezug auf Regelungen sein, die man im Vertrag eindeutig festgelegt wähnte, die aber in der praktischen Ausgestaltung dennoch viele Fragen aufwerfen – etwa der Einflug in Luftsperrgebiete oder der Sicherheitsabstand zu Kernkraftwerken und Industrieanlagen. Hierbei könnte man sich an den generell sehr hohen deutschen Sicherheitsstandards orientieren (2000 Fuß Flughöhe / 1,5 Kilometer seitlicher Abstand). Zudem legen viele Staaten überzogenen Wert auf den Schutz des erflogenen Datenmaterials, das offiziellen Stellen aller Vertragsstaaten zur Verfügung steht. Weiterhin harren spezielle Fragen, wie die der Durchführung von Transitflügen von Russland in die Region Kaliningrad über die baltischen Staaten hinweg, noch einer detaillierten, endgültigen Regelung.

Russland beharrt als einziger Vertragsstaat auf dem vertraglichen Recht der so genannten „Taxi-Option“. Das bedeutet, dass auch Nationen, die ein eigenes Beobachtungsflugzeug besitzen, bei Missionen über Russland ein vom beobachteten Staat zur Verfügung gestelltes Flugzeug benutzen müssen. Weil Russland – ebenso wie die USA – 42 Passivquoten hat, also 42 Beobachtungsmissionen über eigenem Territorium erdulden muss, die jeweils etwa eine Woche dauern, ist es gezwungen, fast ständig ein technisch einwandfreies Beobachtungsflugzeug bereitzustellen. Dadurch sieht sich Russland mit hohen Zusatzkosten konfrontiert und versucht diese unter anderem dadurch zu mindern, dass seine Passivquote durch die anderen Vertragsstaaten nicht in vollem Umfang ausgeschöpft wird.

Den Friedenswillen von Konfliktparteien testen

Mit Beginn der zweiten Implementierungsphase Anfang 2006, dem „Realen Konzept“, ist zusätzlich zu den optischen Sensoren auch der uneingeschränkte Einsatz von Infrarot-Zeilenabtastgeräten und abbildenden Radargeräten erlaubt. Bislang gibt es jedoch noch keine Geräte dieser Art, die einen vertragskonformen Einsatz gewährleisten würden, zumal sich die Vertragsstaaten noch nicht auf alle technischen Details festgelegt haben.

Wenn man heute in die praktische Ausgestaltung des Vertrages über den Offenen Himmel investiert, muss man sich auch fragen, wo der Nutzen in einigen Jahren liegen wird. Für das bisherige Vertragsgebiet haben bereits die Testbeobachtungsmissionen gezeigt, welches Potenzial für die Vertrauensbildung vorhanden ist. Die Luftraumüberwachung ließe sich künftig auf viele Krisengebiete übertragen, beispielsweise unter Mandat der Vereinten Nationen oder der Organisation für Sicherheit und Zusammenarbeit in Europa. Denn nichts testet den viel beschworenen Friedenswillen zweier Konfliktparteien mehr als die gemeinsame Vorbereitung und Durchführung derartiger Luftbeobachtungsmissionen, deren Ergebnisse ihnen uneingeschränkt und in vollem Umfang zur Verfügung stehen.

Eine zweite Entwicklungslinie führt zurück nach Europa, wo das gegenwärtige Ringen um ein gemeinsames Auftreten der Europäischen Union an einem zugegebenermaßen kleinen, aber wirkungsvollen Instrument der Rüstungskontrolle zum Erfolg gebracht werden könnte, nämlich im Rahmen des Vertrages über den Offenen Himmel.

In diese Richtung geht eine deutsche Initiative, die für die Beschaffung eines eigenen europäischen Beobachtungsflugzeuges und für die Gründung eines eigenständigen Verbandes der Europäischen Union für den Offenen Himmel wirbt. Dabei ist noch kein spezieller Flugzeugtyp ausgewählt. Die geforderten Leistungsparameter sind jedoch unter Experten unumstritten: Das Flugzeug sollte über das volle Sensorspektrum verfügen, eine Reichweite im Tiefflug (in etwa tausend Metern Höhe) von annähernd 4000 Kilometern haben und ausreichend Sitzplätze aufweisen, um zusätzlich zur Bedienungsmannschaft auch Vertreter von Konfliktparteien, internationalen Organisationen und Medien mit an Bord nehmen zu können.

Dieses Flugzeug könnte dann in europäischer Zusammenarbeit ausgesucht und ausgerüstet werden. Auch für den Einsatz sind die unterschiedlichsten Kooperationsmodelle denkbar. Am charmantesten ist unter dem Blickwinkel gesamteuropäischer Sichtbarkeit das eines eigenständigen Verbandes der Europäischen Union analog zum Awacs-Geschwader der Nato am Standort Geilenkirchen. Dabei ist es durchaus vorstellbar, ja sogar wünschenswert, ein derartiges Projekt der Europäischen Union so flexibel und offen anzulegen, dass es zur Kooperation in wichtigen Bereichen – beispielsweise in der Sensorik – mit den anderen Vertragspartnern, gerade auch Russland und Ukraine, genutzt werden kann. ■

***Oberst i.G. Ernst Britting** leitet die Abteilung Offener Himmel des Zentrums für Verifikationsaufgaben der Bundeswehr in Geilenkirchen.*

SENSORAUSSTATTUNG

Spähen mit Gespür

Hinsehen ist erlaubt – aber bitte nicht zu genau. Denn die Grenze zwischen legaler Informationsbeschaffung und unerwünschter Spionage ist schmal.

Von Hartwig Spitzer

Eine äußerst knifflige Angelegenheit in den Verhandlungen zum Vertrag über den Offenen Himmel war die Frage, über welche Sensoren die Beobachtungsflugzeuge verfügen sollten. Grundsätzlich war eine Allwettertauglichkeit anzustreben, um auch nachts und bei bewölktem Himmel Informationen gewinnen zu können. Die Bewölkung stellt vor allem für die hohen nördlichen Breiten ein Hindernis dar, weshalb für diese Gebiete auch das Potenzial von Beobachtungssatelliten eingeschränkt ist.

Schließlich einigten sich die Verhandlungspartner darauf, schrittweise eine breite Sensorausstattung einzuführen. Zunächst kommen nur optische Panorama- und Einzelbildkameras sowie Videokameras mit Echtzeitanzeige zum Einsatz. Später kann diese Ausrüstung durch Infrarot-Zeilenabtastgeräte und Radar mit synthetischer Apertur ergänzt werden. Für die vorgeschriebene Zulassung dieser Sensoren mussten aber erst noch aufwendige Kalibrationsverfahren erarbeitet werden, damit ihre Leistungsfähigkeit die im Vertrag festgelegten Parameter nicht übersteigt. Solche Details werden von der Beratungskommission in Wien geklärt.

Alle Sensoren dürfen nur nach unten und seitwärts ausgerichtet sein. Eine Beobachtung in Flugrichtung ist untersagt. Diesen Passus hatte sich Russland ausbedungen, da es befürchtete, die solcherart gewonnenen Daten könnten zur Programmierung von Marschflugkörpern genutzt werden.

Von welcher Art sind nun die Ziele, die für Beobachtungsflüge ausgewählt werden? Prinzipiell kann und darf alles fotografiert werden, was der beobachtende Staat im Sinne der Transparenz und Vertrauensbildung für wichtig erachtet – unabhängig davon, wo die Objekte liegen oder ob sie zivil oder militärisch genutzt werden. In der Praxis werden hauptsächlich militärische Anlagen und Aktivitäten sowie Rüstungsfirmen im Mittelpunkt des Interesses stehen. Dazu gehören insbesondere:

➤ Kommandostellen und Fernmeldeeinrichtungen,
➤ Kasernen, Fahrzeugdepots und Truppenübungsplätze,
➤ Flugplätze, Marinebasen und Raketenstützpunkte,
➤ militärische Produktions- und Wartungseinrichtungen,
➤ Transportrouten wie Straßen, Brücken, Eisenbahnlinien, sowie
➤ militärische Aktivitäten und Manöver.

Krisenregionen erfordern dabei eine höhere Aufmerksamkeit als Gebiete, in denen nicht mit gravierenden Veränderungen zu rechnen ist. Zusätzlich müssten hier auch irreguläre Truppen, neu angelegte Minenfelder sowie Flüchtlingsströme und -lager beobachtet und Schadensbewertungen vorgenommen werden.

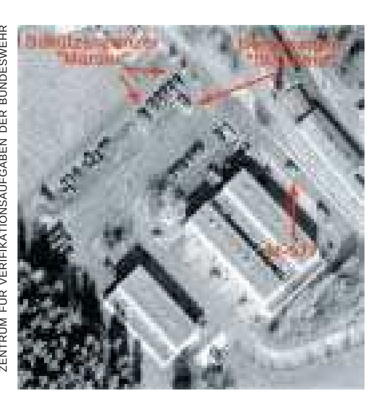
Die aufgenommenen Bilddaten müssen von speziell geschultem und erfahrenem Personal ausgewertet werden, damit sie den vollen Informationsgehalt preisgeben. Dabei ist der Zugang zu ergänzenden Informationen aus anderen Quellen hilfreich, um die Rohbilder im richtigen Kontext analysieren zu können.

Allgemein erfolgt die militärische Bildauswertung in mehreren Stufen. Sie beginnt in der Regel mit der Detektion, also dem Erkennen, ob ein bestimmtes ▶

UWE REICHERT

Gegenwärtig werden Infrarot-Zeilenabtastgeräte für den späteren Einsatz erprobt. Dieses hier ist für Demonstrationszwecke in eine Bundeswehr-Transall eingebaut.





ZENTRUM FÜR VERIFIKATIONSAUFGABEN DER BUNDESWEHR

Das während eines Testbeobachtungsfluges aufgenommene Foto einer deutschen Kaserne illustriert den Informationsgehalt der Bilddaten. In der Ausschnittvergrößerung (oben) lassen sich Panzer verschiedenen Typs unterscheiden.

Objekt wie etwa ein Fahrzeug auf der Aufnahme vorhanden ist oder nicht. Die anschließende allgemeine Identifizierung ordnet das Objekt in eine bestimmte Klasse ein. Im Beispiel mag das Fahrzeug als Panzer eingestuft werden. Dann erfolgt die präzise Identifizierung, etwa: der Panzer ist ein schwerer Kampfpanzer vom Typ T-72. Eine weiter gehende Beschreibung des Objekts legt die genauen Abmessungen, Ausstattung und Konstruktionsdetails fest wie etwa das Kaliber des Geschützes.

Die im Vertrag über den Offenen Himmel festgelegte Bodenauflösung, die dreißig Zentimeter nicht unterschreiten darf, ist nun gerade so gewählt, dass eine Beschreibung der Objekte nicht möglich ist. Allzu viele Details möchte man eben nicht offenbaren, und Anstrengungen, die auf das Beschreiben von Objekten hinzielen, werden als Spionage angesehen. Für die Zwecke des Vertrages reicht es jedoch aus, Objekte zu identifizieren und zu zählen.

Mit den optischen Kameras lassen sich Fahrzeuge, Raketen und Geschütze allgemein identifizieren. Truppeneinheiten, Flugzeuge, Raketenstützpunkte, Schiffe, Transportrouten und Kommandostellen können sogar präzise identifiziert werden.

Die panchromatischen – schwarzweiß abbildenden – Filme der optischen Kameras werden seit langem in der militärischen Luftaufklärung und der zivilen Fotogrammetrie eingesetzt. Gewöhnlich wird die Bildfolge so gewählt, dass sich zwei aufeinander folgende Aufnahmen um sechzig Prozent überlappen. Dies gewährleistet, dass jedes Objekt in der fotografierten Szenerie auf mindestens zwei Aufnahmen zu sehen ist. Der unterschiedliche Beobachtungswinkel ermöglicht, durch Stereo-Betrachtung die Höhe eines Objekts zu ermitteln beziehungsweise sogar ein räumliches Geländemodell zu erstellen.

Der Hauptgrund für den Einsatz dieser konventionellen Nassfilmkameras ist neben der hohen Auflösung des Negativmaterials die gute Dokumentationsfähigkeit: Digitale Daten wären viel leichter zu manipulieren. Trotzdem verfügen die Beobachtungsflugzeuge auch über Videokameras. Sie erreichen jedoch bei den festgelegten Mindestflughöhen in der Regel nicht die für Videobilder maximal erlaubte Bodenauflösung von fünfzig Zentimetern. Ihr großer Vorteil ist jedoch die direkte Wiedergabe der Bilddaten während des Fluges. Zudem können laut Vertrag auch Farb-Videokameras eingesetzt werden, wodurch weitere Informationen für die Bildauswertung zur Verfügung stehen.

Infrarot-Kameras: Wärme verrät mehr als Licht

In der ab Anfang 2006 beginnenden Phase des „Realen Konzepts“ können auch Infrarot-Zeilenabtastgeräte mit einer Auflösung von fünfzig Zentimetern als Sensoren eingesetzt werden. Der große Vorteil dieser Kameras ist, dass sie die Wärmestrahlung registrieren, die jeder Körper aussendet. Damit liefern sie Informationen, die von optischen Kameras nicht registriert werden können. Das Strahlungsspektrum eines Körpers, der sich auf Raumtemperatur befindet, hat sein Maximum im Wellenlängenbereich von 8 bis 13 Mikrometern, während das laufende Triebwerk eines Düsenflugzeugs hauptsächlich im Bereich zwischen etwa einem und fünf Mikrometern strahlt. (Zum Vergleich: Die Wellenlängen von sichtbarem Licht liegen zwischen 0,4 und 0,68 Mikrometern.)

Mit diesen Infrarot-Kameras lassen sich verschiedenste Aktivitäten nachweisen, was insbesondere für die Beobachtung von Manövern und Fabrikationsanlagen von Wert ist. Fahrzeuge mit laufendem Motor können anhand ihres Wärmeprofils erkannt werden. Geparkte Fahr- oder Flugzeuge schatten die Sonnenstrahlung ab, sodass sich ihre Umrisse auch dann noch auf dem Boden abzeichnen, wenn sie eine gewisse Zeit vor der Aufnahme entfernt wurden. Beobachtungen im nahen Infrarot würden auch Störungen in der Vegetation erkennbar machen, wie sie zum Beispiel durch frisch verlegte Minen auftreten. Allerdings sind Aufnahmen im nahen Infrarot vorerst nicht erlaubt.

Während optische und Infrarot-Kameras passive Systeme sind, ist ein Radar mit synthetischer Apertur ein aktiver Sensor. Das Gerät sendet Mikrowellen aus, die vom Bodenrelief rückgestreut und von der Radarantenne wieder aufgefangen werden. Diese aktive Abtastung macht die Beobachtung unabhängig von den Beleuchtungsverhältnissen; zudem können Mikrowellen auch Wolken ungehindert durchdringen.

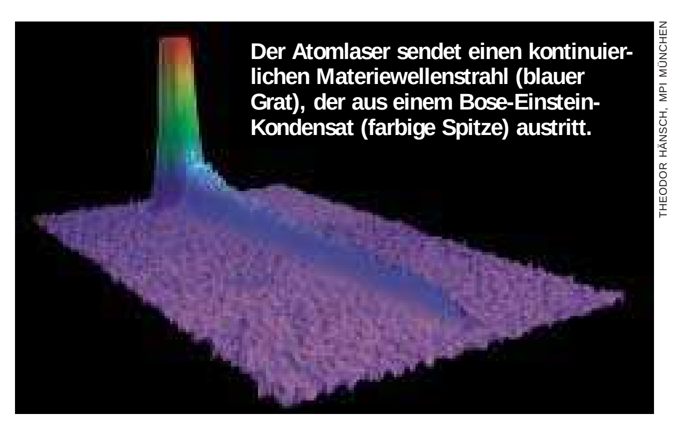
Ein gewisser Nachteil eines derartigen Radarsystems ist, dass die Rohdaten erst aufwendig mit einem Rechner in Bilder umgesetzt werden müssen. Diese sind zudem nicht so einfach zu interpretieren wie optische Aufnahmen. Die Stärke des Radarechos hängt von zahlreichen Eigenschaften der rückstreuenden Fläche ab: etwa von dem Material, von der Rauigkeit, der Neigung der Oberfläche und dem Feuchtigkeitsgehalt.

Für den Radarsensor erlaubt der Vertrag eine Bodenauflösung von drei Metern. Das ist zwar deutlich schlechter als für die anderen Sensoren, reicht aber immer noch aus, um Einrichtungen und Gegenstände wie Flugplätze, Straßen, Brücken, Gebäude und große Luft- und Wasserfahrzeuge zu erkennen. Neuerdings werden mit kommerziell erhältlichen Radarsystemen auch Auflösungen von bis zu einem Meter möglich. Eine der in der Beratungskommission zu lösenden Fragen wird denn auch sein, ob künftig schärfer abbildende Radargeräte eingesetzt werden können. ■

***Dr. Hartwig Spitzer** ist Professor für Physik an der Universität Hamburg und Sprecher der dortigen Arbeitsgruppe Naturwissenschaft und Internationale Sicherheit (CENSIS).*

ALFRIED-KRUPP-WISSENSCHAFTSPREIS

Pioniere im Reich der Atome und Photonen


THEODOR HÄNSCH, MPI MÜNCHEN

Der Atomlaser sendet einen kontinuierlichen Materiewellenstrahl (blauer Grat), der aus einem Bose-Einstein-Kondensat (farbige Spitze) austritt.

In den letzten Jahrzehnten ließen sich viele der bizarren Konsequenzen der Quantenmechanik in Experimenten realisieren, von denen die Schöpfer der Quantentheorie nur träumen konnten. Einen maßgeblichen Anteil daran haben die Physiker Theodor W. Hänsch (61) und Herbert Walther (67) vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei München. Für ihr Lebenswerk erhalten sie zu gleichen Teilen den diesjährigen Alfried-Krupp-Wissenschaftspreis 2002 in der Klasse der Ingenieurs- und Naturwissenschaften.

Hänsch und Walther haben mit ihren zahlreichen Arbeiten gänzlich neue Forschungsgebiete begründet. So entwickelte Hänsch gemeinsam mit Arthur L. Schawlow, einem der Erfinder des Lasers, die Idee der Laser-Kühlung atomarer Gase (SdW 12/97, S. 14) – eine entscheidende Voraussetzung, um Bose-Einstein-Kondensate zu erzeugen. 1998 realisierte er den ersten Atomlaser, der einen kontinuierlichen Strahl kohärenter Materiewellen erzeugt (SdW 5/99, S. 30). Erst kürzlich machten Hänsch und seine Arbeitsgruppe Furore, als es ihnen gelang, einen neuen Quantenzustand extrem kalter Materie zu erzeugen (SdW 5/02, S. 12).


KRUPP-STIFTUNG

Herbert Walther (l.) und Theodor W. Hänsch

Herbert Walther gehört zu den Pionieren der Quantenoptik und hat zudem bahnbrechende Forschungsleistungen in der Atom- und Laserphysik erbracht. Er begründete das Forschungsgebiet der so genannten Hohlraum-Quantenelektrodynamik (SdW 6/93, S. 48) mit seinen Experimenten zum „Mikromaser" oder Ein-Atom-Maser. Darin wechselwirken einzelne Atome oder Ionen mit einzelnen Photonen oder Quanten des elektromagnetischen Feldes. Mit diesem elementaren System lassen sich die Grenzen zwischen dem mikroskopischen Bereich der Quantenmechanik und der makroskopischen Welt der klassischen Physik ausloten. Aus der Grundlagenforschung mit Ein-Atom-Masern sind später winzige Lasersysteme hervorgegangen, die eine große Rolle in der optischen Kommunikation spielen.

Beide Physiker studierten und promovierten an der Universität Heidelberg. Hänsch lehrte und forschte anschließend bis 1986 mehr als fünfzehn Jahre an der Universität Stanford. Walther führten Gastaufenthalte nach Frankreich und in die USA. Nach Professuren in Bonn und Köln wechselte er an die Ludwig-Maximilians-Universität München und wurde 1975 Direktor der neu gegründeten Projektgruppe für Laserforschung der Max-Planck-Gesellschaft, aus der 1981 das MPI für Quantenoptik hervorging.

Die Alfried Krupp von Bohlen und Halbach-Stiftung hat den Alfried-Krupp-Wissenschaftspreis 1998 eingerichtet, der an herausragende Wissenschaftler aus den Natur- und Ingenieurs- sowie den Geistes-, Rechts- und Wirtschaftswissenschaften vergeben wird und mit jeweils 52 000 Euro dotiert ist.

L'ORÉAL / UNESCO AWARDS FOR WOMEN IN SCIENCE

Blick in die Zelle

Schon die kleinsten Einheiten des Lebendigen, die Zellen, sind komplexe und hochorganisierte Wunderwerke, die aus tausenden von Proteinen aufgebaut sind. Eine der Standardmethoden, um die Proteine in den Zellen zu lokalisieren, ist die Immunfluoreszenz-Mikroskopie, die Mary Osborn vom Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen entscheidend mitentwickelt hat. Dafür erhält sie einen der fünf diesjährigen Unesco/L'Oréal-Preise „For Women in Science".

Bei der Immunfluoreszenz-Mikroskopie koppeln zunächst mit Fluoreszenzfarbstoffen markierte Antikörper an die jeweiligen Proteine, für die sie spezifisch sind. Im unsichtbaren UV-Licht des Fluoreszenzmikroskops leuchten die markierten Proteine dann sichtbar auf. Auf diese Weise lassen sich Strukturen und Entwicklungsstadien von Zellen nachweisen und charakterisieren.

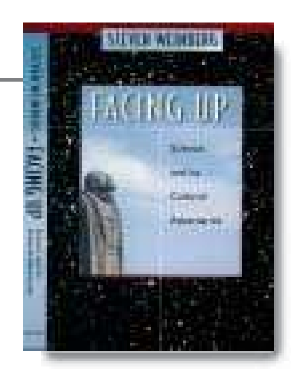
Mary Osborn hat mit dieser Technik die Verteilung und Funktion der verschiedenen Proteinfilamente untersucht, aus denen sich das Zellskelett zusammensetzt. Aus diesen Forschungen ergaben sich auch wichtige Anwendungen für die Krebsdiagnose: So eignen sich die Proteine der so genannten intermediären Zellfilamente als Markermoleküle, mit denen sich die wichtigsten Tumorarten unterscheiden lassen.


MICHELINE PELLETIER / CORBIS SYGMA

Mary Osborn

Mary Osborn promovierte 1967 an der Pennsylvania State University und forschte anschließend zwei Jahre in der Arbeitsgruppe des Biologie-Nobelpreisträgers James Watson an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts). Seit 1975 arbeitet sie am MPI für biophysikalische Chemie und ist außerdem Professorin an der medizinischen Fakultät der Göttinger Universität.

Die Initiative „For Women in Science" wurde 1999 von der Unesco und der Firma L'Oréal ins Leben gerufen. Der mit insgesamt 20 000 US-Dollar dotierte Preis wird jährlich an fünf herausragende Wissenschaftlerinnen auf verschiedenen Kontinenten verliehen. Zusätzlich vergibt die Initiative zehn Stipendien, die Nachswuchsforscherinnen ermutigen sollen, ihre Karriere in der Wissenschaft fortzusetzen.



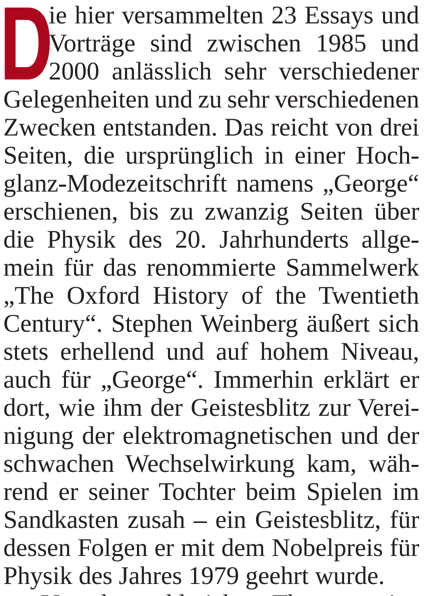
PHYSIK

Steven Weinberg

Facing up

Science and its Cultural Adversaries

Harvard University Press, Cambridge (Massachusetts) 2001. 296 Seiten, $ 26,–



Die hier versammelten 23 Essays und Vorträge sind zwischen 1985 und 2000 anlässlich sehr verschiedener Gelegenheiten und zu sehr verschiedenen Zwecken entstanden. Das reicht von drei Seiten, die ursprünglich in einer Hochglanz-Modezeitschrift namens „George“ erschienen, bis zu zwanzig Seiten über die Physik des 20. Jahrhunderts allgemein für das renommierte Sammelwerk „The Oxford History of the Twentieth Century“. Stephen Weinberg äußert sich stets erhellend und auf hohem Niveau, auch für „George“. Immerhin erklärt er dort, wie ihm der Geistesblitz zur Vereinigung der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung kam, während er seiner Tochter beim Spielen im Sandkasten zusah – ein Geistesblitz, für dessen Folgen er mit dem Nobelpreis für Physik des Jahres 1979 geehrt wurde.

Von den zahlreichen Themen seien drei herausgegriffen. Neben den Forschungsuniversitäten, die zur Promotion führen und unseren Universitäten vergleichbar sind, gibt es in den USA Bildungsanstalten wie das kleine, traditionsreiche Washington College in Chestertown (Maryland), deren Qualitäten Weinberg in dem Vortrag „Science as a Liberal Art“ preist: „In den mehr als zwanzig Jahren, die ich an Fakultätssitzungen teilgenommen habe, ist es niemals vorgekommen, dass ein Physiker oder eine Physikerin wegen guter Lehre statt guter Forschung angestellt worden wäre. Aber Gott sei gedankt für die Vielfalt in Amerika! An kleinen Bildungsanstalten wie Washington College steht die Lehre so im Mittelpunkt, wie es an den Forschungsuniversitäten nur selten der Fall ist.“ Gute Gründe mögen dafür sprechen, an den deutschen Universitäten der Lehre ein größeres Gewicht zu verleihen als bisher. Das Weinberg-Zitat zeigt aber, dass die Bildungsanstalten der Vereinigten Staaten als Vorbild hierfür nicht dienen können.

Zweitens der Realitätsbegriff. Weinberg bekennt, dass er nicht weiß, worin die Realität aufdringlich realer Objekte wie Steine und Stühle besteht, ja, was das überhaupt ist – Realität. Indem er das Nachdenken darüber den Philosophen überlässt, fügt er hinzu, dass ihn die Naturgesetze als genauso real beeindrucken wie die Objekte der unmittelbaren Anschauung. Natürlich geht es ihm nicht um Formulierungen der Naturgesetze, die je nach Kulturkreis oder Zufallseinflüssen verschieden ausfallen mögen, sondern um die Zusammenhänge zwischen direkt beobachtbaren Phänomenen, die sie erfolgreich behaupten: Welche Anordnung jetzt impliziert welche Zeigerstellungen später? Anders als für den Philosophen kann für den Physiker nicht nur ein Ding, sondern auch ein Naturgesetz die Erfahrung von Realität auslösen. Mir scheint, dass dies für Physiker so selbstverständlich wahr ist, dass es niemand ausgesprochen hat, bevor Weinberg es 1993 in seinem Buch „Der Traum von der Einheit des Universums“ explizit machte. Im vorliegenden Buch sagt er es – in „Sokal’s Hoax“ – so: „Wenn ich sage, dass die Gesetze der Physik real sind, dann meine ich in ziemlich demselben Sinne real wie die Steine im Feld (was immer das bedeuten mag) und nicht in demselben Sinn wie die Regeln des Baseball“, was Konstruktivisten wie Stanley Fish behaupten.

Nicht dass die Regeln des Baseball von den Naturgesetzen unabhängig wären: „Wenn die Bälle unter dem Einfluss der Erdanziehung anders flögen, würden die Regeln eine größere oder eine geringere Entfernung für die Abschlagspunkte (*bases*) bestimmen.“ Aber sie „geben auch die historische Entwicklung des Spiels und die Vorlieben der Spieler und Fans wieder“ – im Unterschied, selbstverständlich, zu den Naturgesetzen.

Drittens der Reduktionismus. Weinberg bekennt sich zu einer Ausprägung, für die er seinen Kollegen Freeman J. Dyson zitiert: Es geht darum, „die Welt der physikalischen Phänomene auf eine endliche Menge fundamentaler Gleichungen zu reduzieren“. Wer wie ein wisssüchtiges Kind immer wieder „Warum?“ fragt, wird, den „Pfeilen der Erkenntnis“ folgend, bei dem Standardmodell der Elementarteilchentheorie ankommen. Alle Pfeile weisen nämlich auf dieses hin. Nicht schließlich, sondern vorläufig. Von ihnen aus auf die Stringtheorie.

Dass es emergente Phänomene und Gesetze gibt, bestreitet Weinberg nicht. Sie mögen durch die fundamentalen Naturgesetze zwar nicht festgelegt werden, aber ihr Auftreten zeigt, dass sie mit ihnen im Einklang sind. Wären die fundamentalen Naturgesetze ganz andere, würden sie die Ausbildung des beobachteten emergenten Verhaltens wohl nicht zulassen.

Jedem Essay des Bandes hat Weinberg eine Vorbemerkung vorangestellt, aus der



PHYSIKGESCHICHTE

Lore Sexl und Anne Hardy

Lise Meitner

Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek 2002. 158 Seiten, € 8,50

Das ist ein prima Buch: eine ausgewogene Darstellung der bedeutenden Physikerin und Persönlichkeit Lise Meitner, handlich, hervorragend lesbar, dabei grundsolide und in ein nutzerfreundliches und reich bebildertes Layout gekleidet. Lore Sexl und Anne Hardy belasten den Text nicht mit den physikalischen Details – das bleibt sinnvollerweise umfangreicheren Biografien wie der von Ruth Lewin Sime überlassen – und gewähren stattdessen einen Blick auf die private Seite von Meitners langem Leben.

In der umstrittenen Frage, ob sie neben Otto Hahn einen Nobelpreis für die Entdeckung der Kernspaltung verdient hätte, bleiben die Autorinnen neutral und referieren stattdessen sachlich die Faktenlage. Das ist wohltuend, denn oft scheint es, als ob die Meitner auf diese Frage reduziert würde, und das wird ihrer unbestreitbaren Bedeutung als Atomphysikerin sicher nicht gerecht.

Nur auf einen kleinen Fehler (Bildunterschrift S. 75) sei noch hingewiesen: Neben Lise Meitner sitzt nicht P. P. Ewald, sondern Max Delbrück, der spätere Begründer der Molekularbiologie. Auch seine Person wäre eine Bereicherung für Rowohlts Monografien-Reihe.

Alexander Pawlak

Der Rezensent ist Diplom-Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Marburg.

dessen Entstehung und Wirkung hervorgehen und die ihn mit anderen Essays des Bandes verbindet. Zu den größeren Themen gehören auch das anthropische Prinzip (elf Verweise im Register) sowie die Religion (28). Gegen religiöse Auffassungen hat sich Weinberg stets entschieden gewendet. Dies hat ihm viel Kritik eingebracht, auf die er brillant reagiert.

Mit seinen Essays will Weinberg Politiker und das allgemeine Publikum ansprechen. Deshalb muss er mehr erklären – genauer: mehr vorgefasste Meinungen ausräumen – als gegenüber seinesgleichen. Dies gelingt ihm in hervorragender Weise. Jedem, der sich aus erster Hand mit seiner, aber nicht nur seiner, rationalen Auffassung der Physik vertraut machen will, sei „Facing Up“ nachdrücklich empfohlen.

Unverhohlen ist das Buch eine Sammlung unabhängiger Essays – was, wenn auch verhohlen, bereits sein Vorgänger „Der Traum von der Einheit des Universums“ war. Trotz zahlreicher Überschneidungen lohnt es, beide Bücher zu lesen.

Henning Genz

Der Rezensent ist Professor für Physik mit dem Arbeitsgebiet Theorie der Elementarteilchen am Institut für Theoretische Teilchenphysik der Universität Karlsruhe.

PALÄONTOLOGIE

Deborah Cadbury

Dinosaurierjäger

Der Wettlauf um die Erforschung der prähistorischen Welt

Aus dem Englischen von Monika Niehaus.
Rowohlt, Reinbek 2001. 448 Seiten, € 22,90





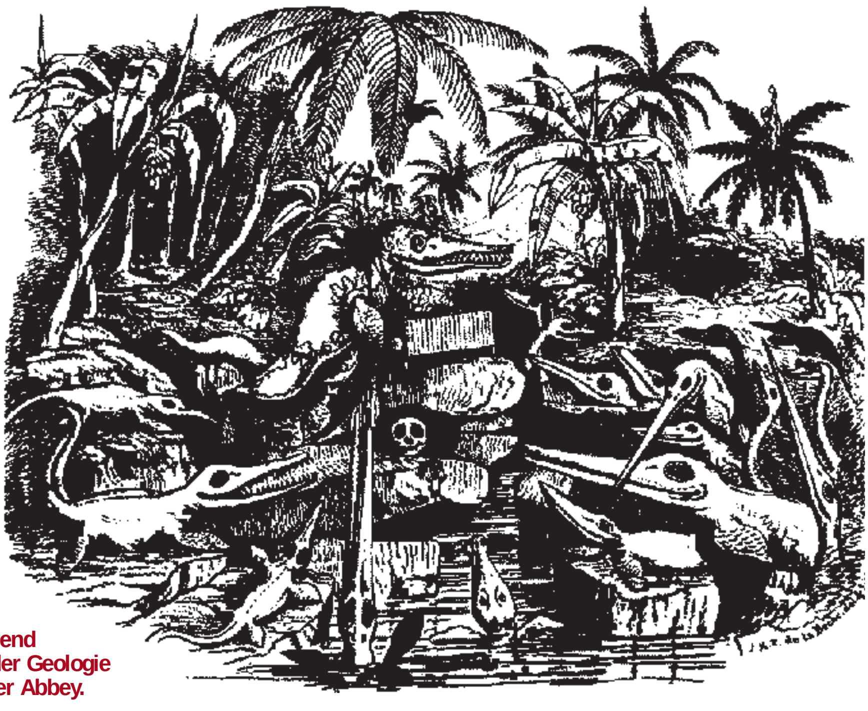
Spotten wir nicht über die plumpen Dinosaurier-Modelle, die Richard Owen 1853 für den Crystal Palace schuf! Die Pioniere der Paläontologie setzten dem *Iguanodon* den Dorn, den er am Vorderfuß trug, als Rhinozeros-ähnliches Horn auf die Nase. Aber sie taten damit das Beste, was nach dem Wissensstand ihrer Zeit erschließbar war. Zudem sahen die ersten Dinosaurier-Forscher sich noch genötigt, ihre Erkenntnisse mit der Überlieferung der Bibel in Einklang zu bringen. Schließlich war es zu der Zeit durchaus üblich, dass sich Geistliche mit den Wissenschaften beschäftigten. Doch die versteinerten Reste von urzeitlichen Schreckens-Tieren belegten eindeutig: Es gab schon vor Urzeiten Leben auf der Erde, das geradezu unglaublich anders war als alles bislang Vertraute.

Die britische Buchautorin und BBC-Fernsehproduzentin Deborah Cadbury begleitet eine Hand voll Paläontologen bei ihren spannenden Entdeckungsreisen. Sie beginnt bei einer Frau, die lediglich „Handlanger“ der Wissenschaft war und es selbst weder zu Reichtum noch zu Berühmtheit brachte: Mary Annings, die ihren bescheidenen Lebensunterhalt mit dem Sammeln von Fossilien bestritt und dabei unter anderem das erste vollständige Skelett eines Ichthyosauriers fand.

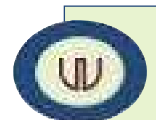
Im Zentrum des Buches steht der jahrzehntelange, hassgeladene Konflikt zwischen zwei höchst ungleichen Persönlichkeiten: Gideon Mantell (1790–1852), Sohn eines Schusters, der sich aus eigener Kraft zum Mediziner und Mitglied der Londoner Royal Society emporarbeitete, und Richard Owen (1804–1892), der sich frei von Geldsorgen ganz der Forschung widmen konnte. Cadbury macht keinen Hehl aus ihrer Sympathie für Mantell, den sie zum Held ihrer Geschichte kürt.

An seinen wissenschaftlichen Verdiensten herrscht kein Zweifel: Mantell hatte den ersten Iguanodon-Zahn gefunden und einem gigantischen, ausgestorbenen, reptilartigen Pflanzenfresser zugeschrieben. Später entdeckte er weitere Skelettfragmente, sogar einen Kiefer. Doch letztlich war Mantell durch seinen Mangel an Zeit und später durch seine deformierte Wirbelsäule stets im Nachteil gegenüber Owen.

Dieser gab Fehldeutungen, die Mantell zwangsläufig unterliefen, gnadenlos der Lächerlichkeit preis, machte sich jedoch dessen brauchbare Ideen ohne Namensnennung zu Eigen. Ehrgeiz, Häme und das untrügliche Gespür für die Nützlichkeit oder Gefährlichkeit von Kollegen brachten ihn systematisch auf der Karriereleiter nach oben. Sympathischer wird er dadurch nicht. Alles Mitgefühl des Lesers gilt daher Gideon Mantell, der stark gehbehindert schmählich und unter Schmerzen stirbt, während Richard Owen auf einem großzügigen Landsitz residiert – ein Geschenk der Krone. Es wirkt als ein – kleiner – Ausgleich, dass auch Owen, der als führender Anatom gelten und damit das Erbe von Georges Cuvier antreten wollte, sich schließlich geschlagen geben musste: Letzten Endes waren es Thomas Huxley und vor allem ▶



Professor Ichthyosaurus hält eine Vorlesung über den ausgestorbenen Menschen. Vorbild dieser Karikatur war der wortgewaltige Reverend William Buckland (1784–1856), Professor der Geologie in Oxford und späterer Dekan der Westminster Abbey.



5×5 Test® Sachbuch
Top Ten Juni 2002

Die Sachbuch-Rezensionen von wissenschaft-online (http://www.5x5test.de) enthalten eine Punktwertung: Für die Kriterien Inhalt, Vermittlung, Verständlichkeit, Lesespaß und Preis-Leistungsverhältnis vergibt der Rezensent jeweils bis zu fünf Punkte. Die Liste führt die zehn Bücher mit den höchsten Gesamtpunktzahlen auf (Erscheinungszeitraum der Rezensionen: 23. März bis 1. Juni 2002).

1. **David Quammen** – 23 Punkte
   Die zwei Hörner des Rhinozeros
   Kuriose und andere Geschichten vom Verhältnis des Menschen zur Natur
   Claassen, 384 Seiten, € 21,00



2. **Detlef Singer** – 22
   Welcher Vogel ist das?
   Franckh-Kosmos, 430 Seiten, € 19,90
3. **P. Gritzmann, R. Brandenberg** – 21
   Das Geheimnis des kürzesten Weges
   Springer, 356 Seiten, € 19,95
4. **Thomas Junker, Uwe Hoßfeld** – 21
   Die Entdeckung der Evolution
   Wissenschaftliche Buchgesllschaft, 264 Seiten, € 29,90
5. **Stephen W. Hawking** – 21
   Das Universum in der Nußschale
   Hoffmann & Campe, 224 Seiten, € 25,95
6. **A. Mellinger, S. Hoffmann** – 20
   Der große Kosmos Himmelsatlas
   Franckh-Kosmos, 96 Seiten, € 29,90
7. **Walter Kirchner** – 20
   Die Ameisen
   Beck, 124 Seiten, € 7,50
8. **Joachim Herrmann** – 19
   Welcher Stern ist das?
   Franckh-Kosmos, 176 Seiten, € 6,50
9. **Detlef B. Linke** – 19
   Kunst und Gehirn
   Rowohlt TB, 256 Seiten, € 12,90
10. **L. Honnefelder, P. Propping (Hg.)** – 13
    Was wissen wir, wenn wir das menschliche Genom kennen?
    Dumont Literatur und Kunst, 328 Seiten, € 24,80

Alle rezensierten Bücher können Sie bei wissenschaft-online bestellen:
Tel.: 06221/9126-841,
Fax: 06221/9126-869,
E-Mail: shop@wissenschaft-online.de

www.science-shop.de







Die beiden streitbaren Helden Richard Owen (links) und Gideon Mantell in späteren Lebensjahren

Charles Darwin, die zu den größten und wichtigsten Erkenntnissen über die Artentstehung gelangten.

Eine rein fachlich motivierte Auseinandersetzung zwischen zwei Wissenschaftlern, die schon 150 Jahre zurückliegt, könnte selbst den geneigtesten Leser irgendwann ermüden, vor allem, wenn der Konflikt über 400 Seiten entwickelt wird und die Erzählung etliche Fachvorträge und Publikationen einschließt. Doch Deborah Cadbury lässt ihren Leser nicht nur an den spannenden Entdeckungen der Fossilien teilhaben, sondern lädt ihn auch in das Privatleben der Forscher ein, vom frischen Eheglück und der Liebe zu den Kindern bis hin zu Unfällen und Krankheiten, Familientragödien und unversöhnlichem Ehestreit.

Geschickt lenkt Cadbury ihren Handlungsfaden vom einen zum anderen und vergisst nicht, ein Auge auf dem Geschick von Mary Annings zu belassen – der armen Gestalt, der die Wissenschaftler so viel zu verdanken hatten und der sie so wenig Anerkennung entgegenbrachten. Dabei bewahrt Cadbury einen gewissen Sinn für Humor. Leider fehlt die im doppelten Sinne köstliche Anekdote, nach der die Forscher bei einem Treffen eine Schildkröte auf Kuchenteig setzten, um die Spuren des Reptils mit einer gefundenen fossilen Fährte zu vergleichen. Der gewünschte Erfolg blieb zunächst aus – das Tier blieb im Teig stecken.

Berühmte und aufschlussreiche Fundstätten wie etwa den Solnhofener Lithografenschiefer erwähnt Cadbury nur am Rande, denn der Roman blickt fast ausschließlich nach England und begnügt sich mit gelegentlichen Hinweisen auf das Weltgeschehen. Doch weitere Porträts von Wissenschaftlern hätten den Handlungsfaden sicherlich zu breit aufgefächert.

Eine angenehme und unterhaltsame, aber auch lehrreiche und lebendige Lektüre: Fast glaubt man Gideon Mantell – mit einer Lupe über einen rätselhaften fossilen Knochen gebeugt – leibhaftig am Schreibtisch sitzen zu sehen.

Julia Bidder

Die Rezensentin hat Biologie und Paläontologie studiert; sie ist Wissenschaftsjournalistin in Saarbrücken.

BIOLOGIE

Bryan Sykes

Die sieben Töchter Evas

Warum wir alle von sieben Frauen abstammen

Aus dem Englischen von Andrea Kamphuis.
Lübbe, Bergisch Gladbach 2001. 336 Seiten, € 19,90



Als wir dieses Buch zur Rezension in die Hände bekamen, waren wir uns fast sicher, dass wir es verreißen würden, denn schon der Titel klingt unseriös (und ist es auch). Aber ganz so einfach ist es nicht – im Gegenteil! Bryan Sykes erzählt eine fesselnde Geschichte über ein ebenso aktuelles wie relevantes Kapitel der molekularen Evolutionsforschung, das in den vergangenen 15 Jahren zu wesentlich neuen Erkenntnissen über den Ursprung des modernen Menschen und die Besiedlungsgeschichte verschiedener Kontinente und Regionen geführt hat.

Hauptdarsteller der Geschichte sind die Mitochondrien, genauer gesagt deren eigenes kleines Genom. Kinder erben die Mitochondrien (und damit deren DNA) ausschließlich von ihrer Mutter; das väterliche Spermium trägt nur einen Zellkern bei, die männlichen Mitochondrien hingegen bleiben bei der Befruchtung der Eizelle außen vor oder werden in der befruchteten Eizelle eliminiert. Die „Ahnentafel“ des mitochondrialen Genoms ist also im Gegensatz zu der des Zellkerngenoms für jeden Menschen unverzweigt: Frauen wie Männer haben es jeweils von ihrer Mutter, die hat es von

ihrer Mutter, und so weiter. So wie Geschwister eine gemeinsame Mutter und Vettern und Cousinen eine gemeinsame Großmutter haben, so gehen weiter entfernt verwandte Menschen auf eine (letzte) gemeinsame Urahnin zurück. Der Begriff der „Stammmutter“ ist allerdings mit Vorsicht zu genießen, denn er gilt in diesem Fall nur für das kleine Mitochondrien-Genom; obendrein ist in Sykes’ Abriss der menschlichen Evolution nur von dessen hypervariabler Region 1 (HVR-1) die Rede, einem kurzen Abschnitt der nicht-codierenden Kontrollregion. Der Löwenanteil des menschlichen Erbgutes liegt im Zellkern und ist ein Patchwork aus den Genomen zahlloser Ur-Ur-Ur…großmütter und -väter, deren Historie hier nicht betrachtet wird.

Während der Vererbung ereignen sich in zufälligen Abständen Mutationen, die sich im Laufe der Zeit in einzelnen Linien ansammeln. Verwandtschaft äußert sich also in Sequenzähnlichkeit, und ausgehend von den DNA-Sequenzen der Jetztmenschen lassen sich ihre verwandtschaftlichen Beziehungen in Form eines Stammbaumes rekonstruieren (Spektrum der Wissenschaft 6/1992, S. 72). Sykes illustriert anhand etlicher spektakulärer Beispiele, welche überraschenden Befunde die mitochondrialen HVR-1-Sequenzen zu Tage brachten.

Besondere Aufmerksamkeit erfährt einleitend die Besiedlung des polynesischen Archipels, die entgegen Thor Heyerdahls Theorie nicht von Nordamerika, sondern von Südostasien aus erfolgte. Hierfür sprachen bereits archäologische Befunde, nämlich Tonscherben der 2500 bis 3000 Jahre alten Lapita-Kultur, die in Polynesien und Mikronesien häufig sind und die auf etwa 6000 Jahre alte Kulturen in China und Taiwan zurückgehen.

Weiter behandelt Sykes die Frage, ob es Überlebende der Zarenfamilie gibt (der Fall Anna Anderson), welche Identität „Ötzi“ zuzusprechen ist und warum eine junge Lehrerin, deren Familie seit Jahrhunderten in England lebt, dieselbe mitochondriale DNA-Sequenz hat wie polynesische Frauen. Diese und andere Beispiele dienen zur Einstimmung auf die „Titelgeschichte“, das genetische Erbe der heutigen Europäer. Nach der traditionellen Lehrmeinung, die vorwiegend auf archäologischen Befunden basiert, stammen wir von jenen Bauern ab, die vor etwa 10000 Jahren aus dem Nahen Osten einwanderten und die bis dahin in Europa ansässigen Jäger und Sammler verdrängten.

Sykes (und andere!) sammelten nun überall in Europa Speichel- oder Blutproben für die Sequenzierung der mitochondrialen Kontrollregion HVR-1, und ▶

PREISRÄTSEL

Dreiecksverhältnisse

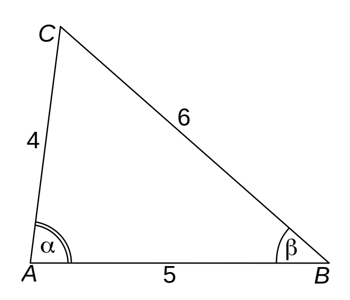
von Pierre Tougne

In einem Dreieck mit den Seitenlängen 4, 5 und 6 (Skizze rechts) ist der Winkel α doppelt so groß wie der Winkel β. Das lässt sich mit Hilfe des Cosinussatzes bestätigen.

Gesucht sind nun alle Dreiecke, bei denen ein Winkel doppelt so groß ist wie ein anderer und deren Seitenlängen hübsch und klein sind, das heißt ganzzahlig und höchstens 20.

Wenn die drei Seitenlängen einen gemeinsamen Teiler haben, kann man sie durch diesen Teiler dividieren und erhält ein ähnliches Dreieck mit noch hübscheren (kleineren) Seitenlängen. Interessant sind also nur „primitive“ Dreiecke, das heißt solche mit teilerfremden Seitenlängen.

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer



Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Spiele „Brain Twister“. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 11. Juni 2002, eingehen.

Lösung zu „Schäfchen zählen“ (April 2002)

Jan schreibt einen Scheck von zwei Euro für Jana aus, um den Betrag zu begleichen.

Jan und Jana verkaufen n Schäfchen zu einem Preis von je n Euro. Der Erlös beträgt folglich n^2 Euro. Die zweitletzte Ziffer, also die Zehnerstelle der Quadratzahl n^2, ist ungerade, sonst hätten Jana und Jan gleich viele Zehn-Euro-Scheine genommen.

Wie jede Quadratzahl lässt sich nun n^2 als $(10b+a)^2$ darstellen, sagte sich Thomas Balsfulland aus Gütersloh. a ist dabei die Einerstelle und b die Ziffernfolge davor. Nach der binomischen Formel gilt

$$n^2=(10b+a)^2=100b^2+20ab+a^2.$$

$20ab$ und $100b^2$ liefern für alle Werte von a und b gerade Zehnerstellen. Wenn also die Zehnerstelle von n^2 ungerade sein soll, dann muss a^2 eine ungerade Zehnerstelle haben.

Betrachtet man nun alle Quadrate aller einstelligen Zahlen a, so haben nur 16 und 36 eine ungerade Zehnerstelle. Beide Zahlen haben aber eine Sechs am Ende. Also wissen wir zwar nicht, ob die Zahl der Schäfchen auf 4 oder 6 endet, aber der Erlös n^2 aus dem Verkauf der Schafe ist in jedem Fall eine Zahl, die mit 6 aufhört.

Jan schiebt also am Ende sechs Euromünzen über den Tisch. Jana hat damit vier Euro weniger aus dem Erlös erhalten als Jan. Zum Ausgleich der Differenz schreibt Jan einen Scheck von zwei Euro aus.

Mathias Wessel aus Hamburg hat die uns unbekannte Quelle des Rätsels ausfindig gemacht. Martin Gardner, der langjährige Unterhaltungsmathematik-Autor von „Scientific American“ (Spektrum der Wissenschaft 11/1998, S. 112), veröffentlichte es vor Jahren dort in den „Mathematical Recreations“ ; auf Deutsch erschien es in „Mathematische Hexereien“ (Ullstein 1979). Gardner verweist dabei auf Carl J. Coe, einen Mathematiker der Universität von Michigan, der sich bereits in den fünfziger Jahren mit diesem Problem beschäftigte.

Die Gewinner der fünf Blechschilder „Kamel“ sind Thomas Balsfulland, Gütersloh; Christoph Paesler, Hannover; Wiebke Fleischer, Düsseldorf; Verena Bihrer, Reinheim; und Johanna Letschert, Sinn.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet „Mathematik“ jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

die anschauliche Beschreibung seiner Exkursionen durch verschiedene Regionen Englands sprüht vor Begeisterung – einer unentbehrlichen Zutat jedes Forschungsprojekts. Die Ergebnisse zeichnen ein erstaunliches Bild: Überall in Europa gibt es – in verschiedenen Häufigkeiten – sieben mitochondriale Sequenzgruppen, die untereinander näher verwandt sind als mit den entsprechenden Sequenzen aus Afrika, Asien oder Amerika. Aus der genetischen Diversität, das heißt der Anzahl der sich unterscheidenden Sequenzpositionen, innerhalb dieser sieben Gruppen lässt sich auf ihr jeweiliges Alter schließen, da man die Mutationsrate aus anderen Untersuchungen schon kennt. Sechs der sieben Gruppen sind sehr viel älter als 10000 Jahre – nur die siebte ist etwa 10000 Jahre alt. Und diese siebte ist im Nahen Osten deutlich häufiger als in Europa! Der Schluss liegt nahe: Nur die 20 Prozent der heutigen Europäer, die dieser siebten Sequenzgruppe angehören, stammen von den jungsteinzeitlichen Bauern ab, die aus dem Nahen Osten einwanderten. Die überwiegende Zahl der europäischen Jetztmenschen sind also direkte Nachkommen der altsteinzeitlichen Jäger und Sammler, die Ackerbau und Viehzucht von den Neuankömmlingen lernten, ohne ihnen jedoch weichen zu müssen. Auch ein direkter Beleg findet sich: Die DNA aus dem subfossilen Zahn eines Menschen, der etwa 7000 Jahre vor der Ankunft der Landwirtschaft in England lebte, fällt mitten in die größte der sieben heutigen Sequenzgruppen.

Nach dem wissenschaftlichen Teil driftet Sykes ins Reich der Fantasie ab

Mit diesem Höhepunkt endet der wissenschaftliche Teil des Buches. Der Rest lebt im Reich der Fantasie. Bryan Sykes lässt die sieben „mitochondrialen Evas“, die Urmütter der heutigen Sequenzgruppen, auferstehen und spekuliert über ihre Lebensumstände. Er gibt ihnen Namen und erfindet pittoreske Lebensgeschichten, so wie sie sich unter den klimatischen, geografischen und kulturhistorischen Gegebenheiten vor 45000 bis 10000 Jahren ereignet haben könnten. Der Leser schaut dem Feuersteinmetz über die Schulter, erlebt Glück und Pech der Wisentjagd mit, zittert in der klirrenden Kälte der Eiszeit, domestiziert Wölfe und ist schließlich bei der Entdeckung dabei, dass sich Grassamen aussäen lassen – die Anfänge der Landwirtschaft. Normalerweise haben solche rein fiktiven Geschichten weder in einem wissenschaftlichen noch in einem populärwissenschaftlichen Buch etwas zu suchen. Aber da hier Fakt und Fantasie so klar getrennt sind, ist es ausnahmsweise vielleicht doch erlaubt … Wir müssen zugeben, es liest sich gut.

Das Buch ist eine faszinierende und treffend erklärte Kombination aus Archäologie, Anthropologie und Molekularbiologie, die sich wie ein Krimi liest. Man merkt dabei kaum, wie viel man gleichzeitig aus diesem Zusammenspiel über die eigene Geschichte lernt. Das simplifizierte Bild von den sieben mitochondrialen Sequenzgruppen in Europa und den zugehörigen Urmüttern spiegelt die komplexe Wirklichkeit – und den heutigen Stand des Wissens – zwar nicht vollständig wider, trägt aber durchaus zum Verständnis der mitteleuropäischen Besiedlungsgeschichte bei. Der Titel des Buches ist als öffentlichkeitswirksames Schlagwort zu verstehen, denn die Gesamtheit der menschlichen Population stammt natürlich nicht nur von sieben Frauen ab.

Leider gelingt es dem Autor nicht, seine zweifellos bedeutenden Beiträge zu dem umfangreichen Forschungsgebiet der menschlichen Populations- und Evolutionsbiologie angemessen einzuordnen. Er erweckt den Eindruck, als sei die ganze, groß gezeichnete Geschichte sein eigenstes Werk. Beiträge anderer Gruppen, wie die bahnbrechenden Befunde über die verwandtschaftlichen Beziehungen der Neandertaler zum modernen Cro-Magnon-Menschen, werden entweder im Passiv abgehandelt oder wie eigene Ergebnisse präsentiert. Die Namen seiner Fachkollegen zählt Sykes lediglich im Nachwort auf – aber dort ist es reichlich spät! Eine etwas bescheidenere Selbstdarstellung (und der Verzicht auf die Kompromittierung seiner wissenschaftlichen Widersacher) hätte dem Buch nicht geschadet.

Ellen Baake und Dorit Liebers

Die Rezensentinnen sind promovierte Biologinnen. Ellen Baake arbeitet am Institut für Mathematik und Informatik der Universität Greifswald, Dorit Liebers am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig.



MATHEMATIK

Peter Gritzmann und René Brandenberg

Das Geheimnis des kürzesten Weges

Ein mathematisches Abenteuer

Springer, Berlin 2002. 356 Seiten, € 19,95

Dies ist eine wundervoll lockere Einführung in ein Stück Mathematik, das mit dem Stichwort „Graphentheorie“ nur ungefähr einzugrenzen ist. Ein Graph, das sind irgendwelche Dinge (die „Knoten“) mit irgendwelchen Verbindungen (den „Kanten“) zwischen ihnen. Wo die Knoten und Kanten liegen, ist völlig unerheblich, und was sie zu bedeuten haben? Jeder hat die Freiheit, in diese abstrakten Strukturen das hineinzuinterpretieren, was seinem Problem entspricht, und flugs landet man bei sehr konkreten Anwendungen: Wie finden der Postbote, der Müllaster und der sprichwörtliche *travelling salesman* die kürzesten Wege, ihre jeweiligen Aufgaben zu erledigen? Sowie die Zahl der Briefkästen, Straßen oder Städte groß wird, wächst die Anzahl der Möglichkeiten ins Astronomische (die „kombinatorische Explosion“), und es bedarf großen Scharfsinns, den Suchaufwand in Grenzen zu halten.

Peter Gritzmann und René Brandenberg von der Technischen Universität München verpacken dieses Material, samt einigen Ausflügen in die Grundlagen, in einen Dialog zwischen der fünfzehnjährigen Ruth und einer mysteriösen künstlichen Intelligenz namens Vim, die in Ruths Computer haust (die Namensgleichheit mit dem Putzmittel ist offensichtlich zufällig). Kleinere Ausflüge in die reale Welt – Eis essen, schwimmen gehen, milde Interventionen von Ruths Eltern, ein netter Junge namens Jan – verschaffen dem Leser die notwendigen Atempausen. Statt weiterführender Literatur gibt es zahlreiche Webhinweise.

Die Figuren der Geschichte sind sehr auf den Zweck des Buches hin konstruiert und völlig unglaubwürdig; aber irgendwie stört das gar nicht.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

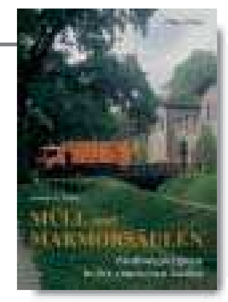
GESCHICHTE

Günther E. Thüry

Müll und Marmorsäulen

Siedlungshygiene in der römische Antike

Philipp von Zabern, Mainz 2001. 72 Seiten, € 24,80



Zugegeben, es gibt appetitlichere Themen in der archäologischen Forschung als Umweltverschmutzung, -bewusstsein und Hygiene in der römischen Antike. Dennoch ist dies gerade in heutiger Zeit von größtem Interesse. Erstmals stehen Mülldeponien und Kloaken, verschmutzte Flüsse und kontaminierte Brunnen, Gestank und Ratten im Zentrum eines archäologischen Sachbuchs. Denn obwohl literarische, epigrafische, künstlerische und vor allem archäologische Befunde reichlich vorhanden sind, widmen sich erst neuerdings Abhandlungen diesem Themenkomplex. Günther E. Thüry, der an der Universität Salzburg römische Kunstgeschichte, Numismatik und Epigrafik lehrt, geht als Erster ins Detail.

Im ersten Kapitel über „siedlungshygienische Vorschriften und Maßnahmen" räumt der Autor mit den Märchen vom „sauberen Römer" auf. Obwohl vier Ädilen für die Straßenreinigung zuständig waren, war es üblich, den Straßenschmutz einfach in die Kanalisation zu spülen. Anwohner waren verpflichtet, ihren Hausmüll zu entsorgen, aber das geschah nicht selten aus Fenstern und von Balkonen aus, wie antike Autoren lebhaft schildern. Dass es üblich war, seine Notdurft an jeder Ecke zu verrichten, belegen Wandaufschriften, die auffordern, dergleichen im Bereich von Heiligtümern zu unterlassen. Der Autor weist auch nach, dass es eine geregelte Müllabfuhr ebenso wenig gab wie eine flächendeckende Wasserentsorgung oder Einzeltoiletten mit Wasserspülung.

Etwa die Hälfte des Buches behandelt den tatsächlichen Umgang mit dem Müll. Anhand von Beispielen und Tabellen (teils etwas zu ausführlich) zeigt Thüry, dass zwar Mülldeponien an den Stadträndern ausgewiesen waren, darüber hinaus aber auch in Siedlungen und Kastellen selbst und im Vorbereich von Stadtmauern Müll abgelagert wurde. Der Scherbenhügel Testaccio in Rom war auf Grund des Gestanks, der den Scherben der Öl- und Fischsoßengefäße entströmte, weit weniger idyllisch als heute. Haushaltsmüll wurde in den Lehmboden festgetreten oder in den Garten geworfen, und Gutshöfe schütteten Schlacht- und Werkstattabfälle in die Landschaft.

Ein besonders schwerwiegendes Problem war die Wasserverschmutzung, vor allem die Kontamination des Grundwassers. Senkgruben, Zisternen und Ziehbrunnen wurden missbraucht, offene Gewässer durch Abfall und ungeklärte Abwässer verunreinigt. Ein Musterbeispiel ist der Tiber, dessen Fische nicht mehr genießbar gewesen sein sollen. Seinem Wasser wurde jedoch, im Glauben an die magische Selbstreinigungskraft des Flusses, kultische und heilende Bedeutung zugesprochen. Auf den Abfalldeponien entwickelte sich eine regelrechte Müllfauna aus Parasiten und Schädlingen, Ratten und Mäusen, die zugleich Krankheitsüberträger waren.

Es gab nicht nur organischen Müll – Bauschutt, Keramik oder Metallschlacken sind ebenfalls Hinterlassenschaften der antiken Wegwerfgesellschaft. Auch Recycling ist keine moderne Erfindung: Fäkalien dienten als Dünger, Urin als Bleichmittel für Walkereien und Gerbereien, Tonscherben als Notizzettel.

Der abschließende Vergleich mit den bisherigen spärlichen Forschungsergebnissen zur römischen Hygiene fällt ebenso knapp wie deutlich aus: Das Vorurteil

Es war üblich, seine Notdurft an jeder Ecke zu verrichten

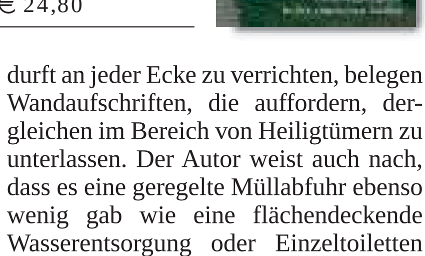
vom „sauberen Römer" darf unbesorgt ad acta gelegt werden. Hygienische Mängel sind trotz Errungenschaften wie Thermen oder Aquädukten nicht zu leugnen. Die Römer empfanden Gestank zwar als störend und erkannten die Gesundheitsgefährdung, waren sich in manchen Punkten sogar bewusst, falsch zu handeln, aber dennoch kam es nur vereinzelt zu Einsicht oder Verhaltensänderung – nach Meinung des Autors vergleichbar mit den heutigen Verhältnissen.

Das Buch ist optisch gut aufgemacht, die Fotos, Rekonstruktionszeichnungen und Pläne erläutern das im Text Gesagte anschaulich. Tabellen zu bestimmten Aspekten wie Uferdeponien, Kastelldeponien oder zu Beseitigung von Müll in Flüssen und Hafenbecken nennen Orte, Befunde und Literatur. Thüry setzt sich vom konventionellen Archäologenstand auch dadurch ab, dass er immer wieder den Bogen zu modernen Autoren wie Bert Brecht und Mark Twain schlägt.

Dem Autor ist damit ein allgemein verständliches, humorvoll und flüssig geschriebenes Buch mit ausführlichem Anhang gelungen, nach dessen Lektüre man um einiges schlauer geworden ist.

Margit Brinke und Peter Kränzle





In dieser Rekonstruktion des Betriebs im WC des Kastells von Housesteads am Hadrianswall hält einer der Benutzer (links) schon den Spülschwamm in Händen, der anstelle des heutigen Papiers verwendet wird, während der Mann im Vordergrund den seinigen auswäscht. Derweil wird munter weitergeplaudert.

Die Rezensenten sind promovierte klassische Archäologen; sie arbeiten als freie Buchautoren und Journalisten in Augsburg.

Die Weltbibliothek der Mathematik

Am 12. und 13. April hat der Weltverband der Mathematiker (International Mathematical Union, IMU) ein Konzept namens „Math-Net" verabschiedet, das die Arbeit der Berufsmathematiker revolutionieren soll.

Die Revolution kommt auf sehr leisen Füßen daher. Erstens in der Form: Da die IMU ihren sehr autonomiebewussten Mitgliedern nichts vorschreiben kann noch will, äußert sie nichts weiter als eine sorgfältig formulierte Empfehlung. Zweitens im Inhalt: Jedes mathematische (Universitäts- oder Forschungs-)Institut möge seine ohnehin vorhandene Website mit einer standardisierten „Math-Net"-Seite anreichern (www.math-net.org). Dem Benutzer erscheint diese (zum Beispiel: http://web.mathematik.uni-freiburg.de/Math-Net/index_de.html) als ein in geschmackvollem Blau gehaltenes Schränkchen mit einheitlich beschrifteten Schubladen für Mitarbeiter, Studenten, Veröffentlichungen und anderes. In diese Schubladen packt jedes Institut zunächst das, was es ohnehin zum jeweiligen Thema im Web bereithält, und das ist zurzeit noch sehr uneinheitlich. Zudem muss Math-Net, das aus einer deutschen Initiative hervorgegangen ist, sich noch verbreiten. Bisher hat in den USA erst eine einzige Institution, die Duke-Universität in Durham (North Carolina), eine Math-Net-Seite.

Die standardisierte Form ist nicht in erster Linie für den Benutzer, sondern für ein automatisiertes Suchsystem wichtig. Über einen allgemeinen Server wären dadurch die Schätze jedes Instituts durch Eingabe eines Stichworts oder anderer Suchkriterien leicht auffindbar. Das Institut müsste nur die eigene Math-Net-Seite mit den richtigen Hilfsinformationen („Metadaten") versehen.

Das funktioniert noch nicht bei der Personensuchmaschine „Persona Mathematica", weil die zugehörige Software, unbezahlt von IMU-Mitgliedern geschrieben wie alles, was zu Math-Net gehört, noch nicht fertig ist. Weit besser ist der Literaturservice MPRESS. Nach einer Vielzahl von Suchkriterien ist dort jede mathematische Arbeit, die auf einem Institutsserver lagert, auffindbar.

Damit ergreift die IMU eine neue Initiative zur Lösung eines immer drängenderen Problems: Wissenschaftliche Zeitschriften drohen unbezahlbar zu werden (Spektrum der Wissenschaft 3/1995, S. 39). Damit wären schon in wenigen Jahren die meisten wissenschaftlichen Arbeiten, mit Ausnahme der aktuellsten, faktisch unzugänglich.

Das Problem trifft alle Wissenschaften, aber die Mathematik verschärft: Ihre Literatur ist besonders unübersichtlich und zugleich besonders haltbar. Wenn ein Mathematiker den Anspruch seines Fachs, ewige Wahrheiten zu produzieren, erfüllt – und das kommt vor –, dann kommen seine Sätze zwar aus der Mode, aber gewinnen häufig zwanzig Jahre später in einem anderen Kontext Bedeutung.

Nur findet sie dann niemand mehr, denn an die Zeitschrift, in der damals die Ergebnisse veröffentlicht wurden, ist nicht heranzukommen – und an die elektronische Version auch nicht, denn niemand hat sich darum gekümmert, sie für die neueste Softwareversion lesbar zu machen. Zentralisierte Lösungen des Problems wie das Archiv www.arxiv.org für Preprints aus aller Welt sind auf lange Sicht stets von Abschaffung bedroht. Stattdessen will die IMU die große Last auf viele kleine Füße stützen: Homepage des Autors, allgemeines Archiv und elektronische Bestände der Zeitschriftenverlage; dies alles verbunden durch eine Struktur wie Math-Net.

Der Gesamtbestand der Literatur soll kostenlos verfügbar sein. Der zuständige Ausschuss der IMU, das „Committee on electronic information and communication (CEIC)", legt in der Empfehlung „Best current practices" (www.ceic.math.ca/index.php?topic=Bestpractices) den wissenschaftlichen Zeitschriftenverlagen nahe, nach einer angemessenen Frist alle Artikel frei ins Netz zu stellen. Das Erschließen des Bestandes könne gleichwohl gebührenpflichtig sein.

Ein viel ehrgeizigeres Projekt hat John Ewing, der geschäftsführende Direktor der American Mathematical Society (AMS), auf den Weg gebracht: die gesamte mathematische Literatur der letzten 2000 Jahre digital verfügbar zu machen (www.ams.org/ewing/Twenty_centuries.pdf). Wenn jeder Mathematiker nur seine eigenen Werke aus der grauen vorelektronischen Frühzeit einscanne und verfügbar mache, sei schon ein großer Teil der Arbeit getan. Der Rest sei mit öffentlichen Fördergeldern finanzierbar, und der Speicherplatzbedarf? Bescheidene 1000 Gigabyte. Beim gegenwärtigen Tempo des technischen Fortschritts passe in zehn Jahren alle Mathematik der Welt auf die Festplatte eines Laptops.

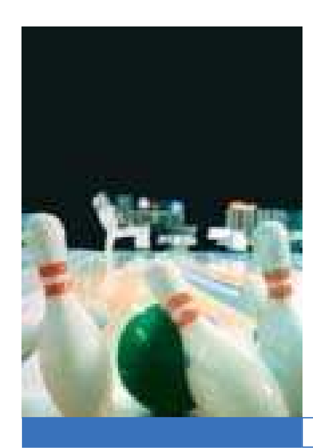
Christoph Pöppe






Unter den Hauptbeteiligten des Projekts Math-Net sind (von links nach rechts): Martin Grötschel, Vizepräsident des Zuse-Instituts Berlin und Kontaktperson für das Math-Net (www.zib.de/groetschel/), Rolf Jeltsch, Präsident der European Mathematical Society (www.sam.math.ethz.ch/~ jeltsch/), Peter Michor (www.mat.univie.ac.at/~ michor/), Vorsitzender des CEIC, und Philippe Tondeur (www.math.uiuc.edu/~ tondeur/), Direktor der Abteilung Mathematik der National Science Foundation.

(Seiten 116, 117 und 118: Anzeige und Beihefter)



Volltreffer im Bowling

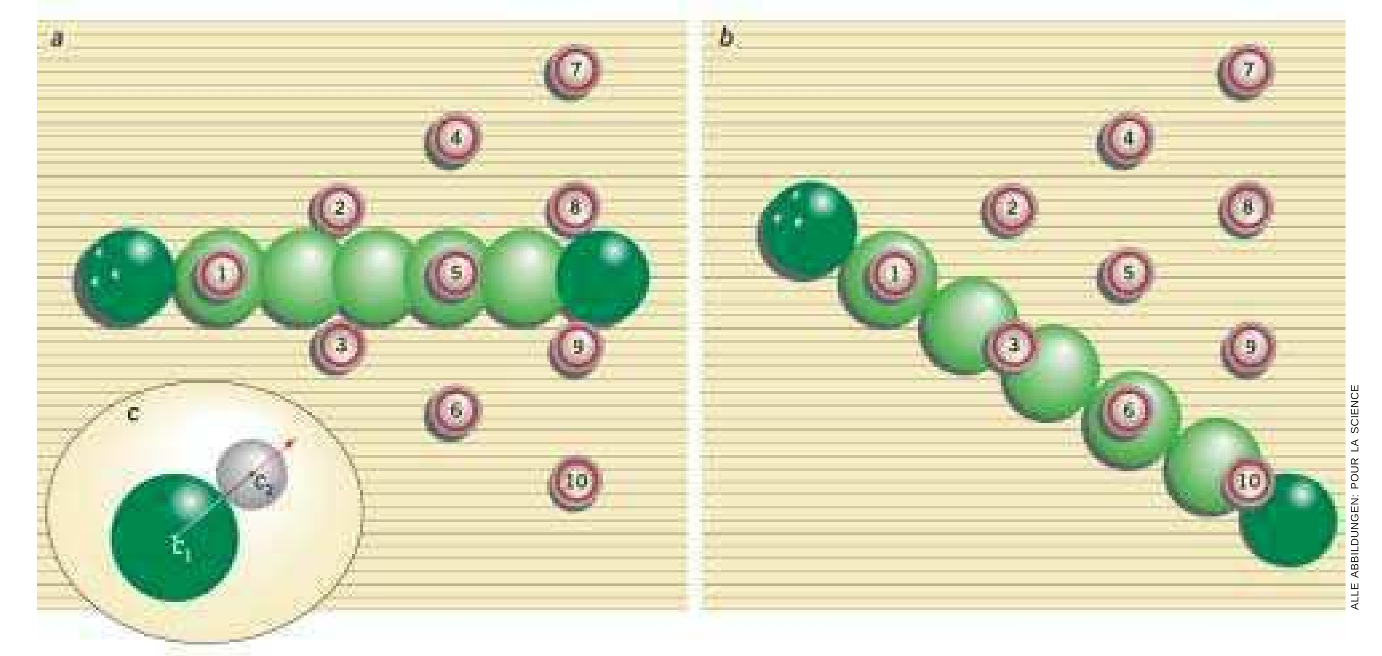
Wenn man mit der Löcherkugel alle Zehne auf einmal umwerfen will, kommt es entscheidend darauf an, wie die Bahn geölt ist.

VON PATRICK DAVID

Die amerikanische Version des Kegelspiels ist nicht ohne Tücken. Jeder Anfänger im Bowling kennt den unangenehm auffälligen Unterschied zwischen dem Irrweg der eigenen Kugel und dem perfekten Wurf des Fortgeschrittenen auf der Nachbarbahn.

Traum jedes Spielers ist der „Strike", ein Wurf, der alle zehn Pins (so heißen im Bowling die Kegel) zum Fallen bringt. Es gibt unzählige Möglichkeiten, dieses Ziel zu erreichen, darunter einige sehr ausgefallene, die allerdings in hohem Maße Glückssache sind. Der Spieler, den es nach hohen Punktzahlen gelüstet, wird weniger diese wilden Würfe anstreben, sondern seine Technik so zu perfektionieren versuchen, dass das Ergebnis möglichst gut steuerbar ist: Besser immer wieder auf dieselbe langweilige Weise alle Pins umwerfen, als sie jedes Mal aufs Neue fantasievoll stehen lassen. Und selbst das ist kaum erreichbar: Professionelle Spieler streben nur danach, jedes Mal einen „Spare", das heißt Abräumen in zwei Würfen, zu erzielen. Für sie ist ein Strike ein – häufiger – Glücksfall, für den Amateur ein Geschenk des Himmels.

Ein Strike ist ein Kompromiss zwischen schwer zu vereinenden Zielen. Die zehn Pins haben einen maximalen Durchmesser von 12,1 Zentimetern. Neun von ihnen stehen auf den Seiten eines gleichseitigen Dreiecks, der zehnte genau in der Mitte. Der Abstand von einem zum nächsten beträgt stets 30,48 Zentimeter. Wenn der Spieler den Ball – so pflegt man die gelöcherte Kugel zu nennen –, der 21,6 Zentimeter Durchmesser hat, perfekt zentral wirft, sprich auf der Verbindungslinie der Pins 1 und 5, dann wird er die randständigen Kegel 4, 6, 7 und 10 unter keinen Umständen treffen (Bild unten). Sollte der Ball besser unter einem Winkel von 30 Grad auf den ersten Pin treffen, damit er genau eine Seite des Dreiecks entlang läuft? Keineswegs! Diese Bahn wäre optimal, wenn es keine anderen Kegel gäbe. Da der Ball seine Opfer zentral trifft, wird er aus seiner Bahn nicht abgelenkt und wirft nur die Pins 1, 3, 6 und 10. Es kommt also darauf an, die Kegel zwar zu treffen, aber eben nicht zentral, sodass der Ball ein wenig im Zickzack läuft. Auf diese Weise werden – zum Beispiel – die Pins 1, 3 und 5 direkt umgeworfen und reißen, schräg ▶



Beim Bowling stehen die zehn Kegel (*pins*) an den Seiten eines gleichseitigen Dreiecks und in dessen Zentrum. Ein getroffener Kegel fällt in Richtung der Verbindungslinie der Mittelpunkte von Kugel und Kegel (*c*). Ein perfekt zentraler Wurf räumt nur die Pins 1, 2, 3, 5, 8 und 9 ab (*a*), ein Wurf entlang einer Seite des Dreiecks nur die Kegel auf dieser Seite (*b*).

ALLE ABBILDUNGEN: POUR LA SCIENCE

fallend, die übrigen mit. Damit der Ball überhaupt so weit abgelenkt wird, muss er zu diesem Zeitpunkt hinreichend langsam sein. Es gilt also, eine geschickte Kombination von Auftreffpunkt, Auftreffwinkel und Geschwindigkeit zu erzielen.

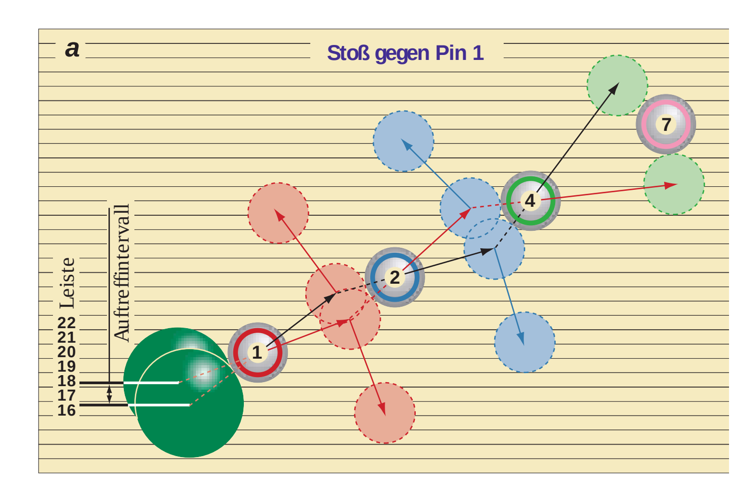
Geometrie des Abräumens: Wenn ein bewegtes rotationssymmetrisches Objekt ein ruhendes, ebenfalls rotationssymmetrisches trifft, dann setzt sich letzteres in Richtung der Verbindungslinie beider Mittelpunkte in Bewegung, unabhängig von der Bewegungsrichtung des ersten (Bild Seite 119, *c*). Damit Pin 1 beim Fallen Pin 2 und in dessen Gefolge auch 4 und 7 mitreißt, muss der Ball den ersten Pin in einem Winkelintervall von 17 Grad erwischen (Bild unten, *a*). Für die Wurffolge 3, 6, 10 beträgt der günstige Winkelbereich immerhin 25 Grad (*b*). Schließlich muss der Ball Pin 5 auf 44 Grad genau treffen, damit dieser Pin 8 umwirft. Bei einem perfekten Strike (*c*) werden nur vier Pins direkt geworfen, nämlich 1, 3, 5 und 9; alle anderen fallen ihren Leidensgenossen zum Opfer.

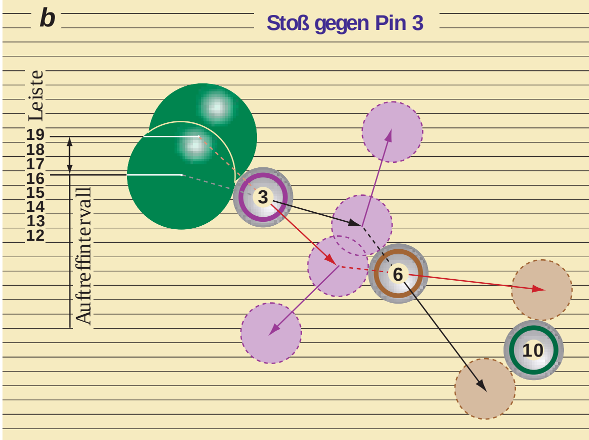
Theoretische Überlegungen dieser Art, die durch die Praxis bestätigt wurden, liefern eine Anleitung für einen idealen Strike. Sie bezieht sich auf eine Bahn aus 39 parallelen Leisten, die wir von rechts nach links nummerieren (Leiste 20 ist genau in der Bahnmitte), einen Ball von 7,5 Kilogramm und einen rechtshändigen Spieler.

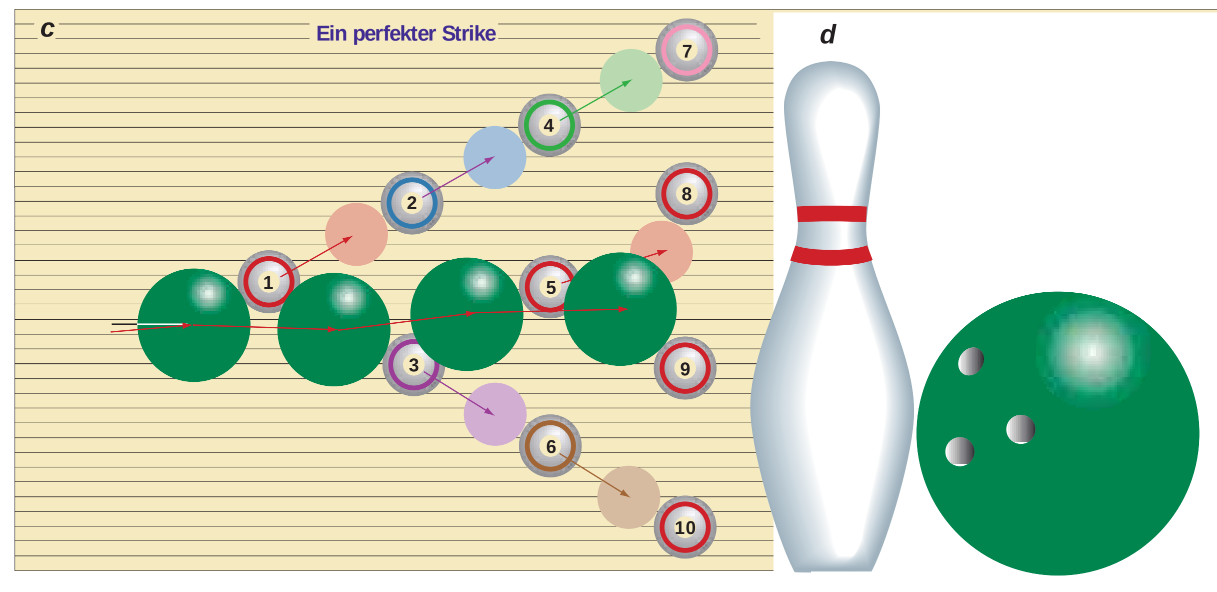
Zum Zeitpunkt des Auftreffens auf Pin 1 (den „Headpin“) muss

- der Mittelpunkt des Balls auf der Grenzlinie zwischen der sechzehnten und der siebzehnten Leiste liegen,
- sein Geschwindigkeitsvektor mit der Längsachse der Bahn einen Winkel zwischen 6 und 8,5 Grad bilden und
- seine Geschwindigkeit mindestens 6 Meter pro Sekunde betragen.

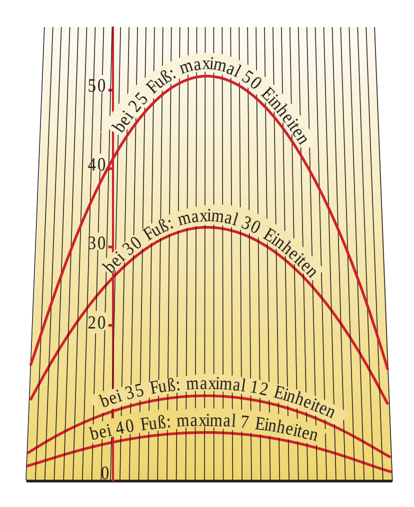
Aber wie soll man diese mindestens 6 Grad Einfallswinkel erreichen? Wenn der Spieler die Kugel am äußersten rechten Rand der Bahn startet und in gerader Linie auf die siebzehnte Leiste zielt, erreicht er nicht mehr als 1,5 Grad. Immerhin steht der Headpin volle 60,5 Fuß (18,44 Meter) hinter der Foullinie, die der Spieler nicht überschreiten darf, und die Bahn ist nur 41,5 Zoll (1,05 Meter) breit. (Zur Vergleichbarkeit mit der Bowling-Literatur geben wir hier ausnahmsweise die Längen in nicht-metrischen







Der Ball muss den Kegel 1 so treffen, dass eine Kettenreaktion die Kegel 2, 4 und 7 umwirft. Dazu muss er innerhalb des angegebenen Intervalls auftreffen (*a*). Für den nächsten Treffer, der den Kegel 3 und in dessen Gefolge 6 und 10 zu Boden bringt, ist das Auftreffintervall geringfügig größer (*b*). Auf dem weiteren Weg wirft die Kugel die Kegel 5 (der Kegel 8 mitreißt) und schließlich 9 (*c*). Eine Bowlingkugel trifft den Pin stets geringfügig unterhalb der Linie maximaler Dicke (*d*).



Die Dicke der Ölschicht auf der Bahn verringert sich von der Mitte zu den Rändern und von der Foullinie zu den Kegeln hin. Das letzte Drittel der Bahn ist trocken. Die Dicke wird in „Einheiten" gemessen; 300 Einheiten entsprechen der Dicke eines Geldscheins.

Einheiten an.) Es hilft also nichts: Man muss den Ball auf einen gekrümmten Weg schicken.

Der elegante Dreh: Wer einen guten Spieler beobachtet, bemerkt, dass dieser die Kugel auf die Rinne neben der eigentlichen Bahn zu wirft – ein Horror für den Anfänger. Im letzten Drittel der Bahn jedoch schlägt der Ball einen Haken – er „hookt", sagen die deutschen Bowling-Profis – und trifft den ersten Pin genau im richtigen Winkel (Bild rechts). Diese Krümmung kommt durch die Rotation des Balls zu Stande.

Die ersten zwei Drittel der Bowlingbahn sind geölt. Auf diesem Teil des Weges bewegt sich die Kugel im Wesentlichen geradlinig. Sie rotiert zwar, doch wegen der geringen Reibung mit ihrer Unterlage wirkt sich das nicht auf ihre Vorwärtsbewegung aus, ebenso wie die Räder eines Autos, die auf Glatteis durchdrehen, dessen Bewegungszustand nicht beeinflussen. Sowie die Reibung auf dem nicht geölten Teil ihre Wirkung entfaltet, wird die Kugel durch Rotation um eine Achse, die gegen die Querrichtung zur Kegelbahn geneigt ist, abgelenkt, ebenso wie beim Auto das Einschlagen der Räder dessen Bewegungsrichtung verändert.

Es kommt darauf an, den ersten Kegel nicht genau in der Mitte zu treffen

Rotationsachse und -geschwindigkeit werden durch den Abwurf bestimmt. Je nachdem, wie der Spieler den Ball aus der Hand entlässt, ist seine Rotationsachse mehr oder weniger geneigt, gleitet er mehr oder weniger weit über den Ölfilm und wird am Ende mehr oder weniger stark abgelenkt. Der Ball selbst ist übrigens nicht homogen: Die Ungleichverteilung der Masse, die durch das Ausbohren der Fingerlöcher entsteht, wird durch einen exzentrischen, schwereren Kern kompensiert – aber nicht ganz. Je nach der verbleibenden Unwucht können verschiedene Bälle sich auf der Bahn völlig unterschiedlich verhalten.

Um das Zielen zu erleichtern, ist in 15 Fuß Abstand von der Foullinie jede fünfte Leiste mit einem Dreieck versehen (Bild rechts). Erfahrene Spieler orientieren sich mehr an diesen Visierpfeilen als an den weit entfernten Kegeln.

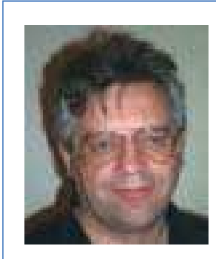
Letzte Ölung: Die Ölschicht auf der Bahn schützt das Material gegen den Aufprall der abgeworfenen Kugel und lässt sie hinreichend lange gleiten, ohne dass sie vorzeitig Energie verliert. In der Bahnmitte ist die Dicke der Ölschicht konstant bis etwa 26 Fuß hinter der Foullinie und nimmt bis 40 Fuß (zwei Drittel der Bahnlänge) gleichmäßig ab. Zu den beiden Rändern der Bahn hin wird die Ölschicht ebenfalls dünner (Bild links).

Dieses Profil kann der Spieler nutzen, um den Weg des Balles feinzusteuern. Offensichtlich gleitet er umso besser, je dicker die Ölschicht ist. Ein randnah gespielter Ball gerät früh auf relativ trockenes Terrain und legt sich entsprechend weit vor dem Ziel bereits in die Kurve. Dagegen hookt ein mittig geworfener Ball erst später.

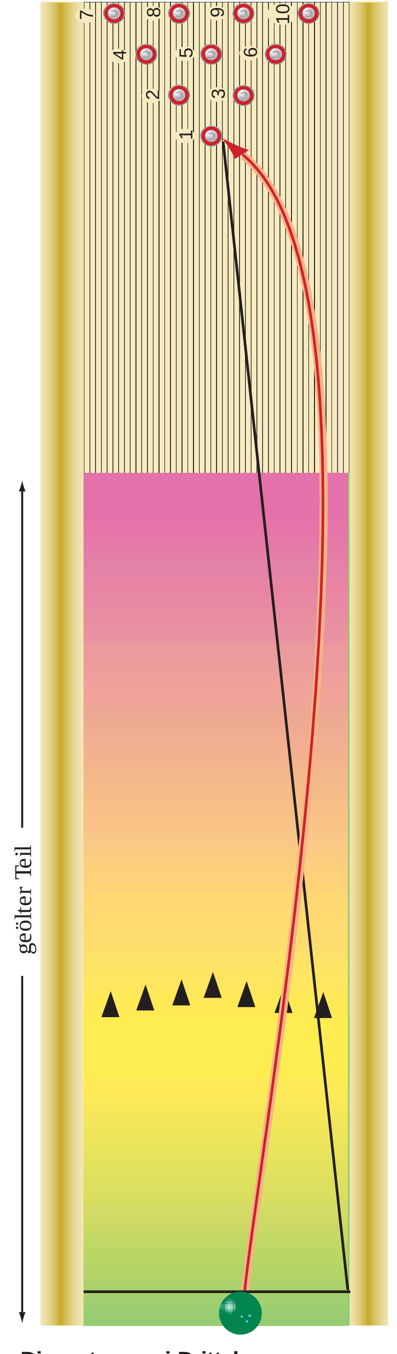
Während des Gleitens auf dickem Öl liegt die Rotationsachse des Balles im Allgemeinen nicht genau quer zur Fortbewegungsrichtung, wie das beim Abrollen der Fall wäre, und die „Bauchbinde" aus Öl, die er sich unterwegs zulegt, steht schräg zur Laufrichtung. Wegen dieser Schräglage ist die Reibungskraft zwischen Ball und Bahn, die sich auf dünnem Öl bemerkbar macht, in zwei Komponenten zu zerlegen: Die eine, parallel zur Bauchbinde, beschleunigt die Rotation des Balles um seine Achse. Die andere, senkrecht dazu, lenkt ihn aus; durch den Kreiseleffekt dreht sich die Rotationsachse um die Vertikale. Damit schwenkt die Bewegungsrichtung allmählich auf die Richtung der Bauchbinde ein. Schließlich rollt der Ball, ohne zu gleiten, in seiner neuen Richtung geradeaus.

Am Ziel angekommen, muss die Kugel noch genügend Bewegungsenergie haben, um den Pins einen guten Teil davon mitzugeben; aber nicht zu viel! Sie muss ja vom Aufprall auf den ersten Pin selbst so beeindruckt sein, dass sie in Richtung des nächsten abgelenkt wird.

Für den Spieler besteht die Kunst darin, bei gegebener Bahn und gegebener Ölung – die er zuvor inspizieren darf – den richtigen Ball und die richtigen Abwurfparameter zu wählen. Wenn Sie bis hierher gelesen haben, wissen Sie über die Theorie schon mehr als die überwiegende Mehrheit der Spieler. Es fehlt „nur noch" Übung, um die Kraft und vor allem das notwendige Fingerspitzengefühl zu erwerben. ■



Patrick David *ist Ausbilder bei der französischen Bowling- und Kegel-Vereinigung (Fédération française de bowling et de sport de quilles, http://www.federationbowling.org) und Autor zahlreicher Bücher zum Thema Bowling.*



Die ersten zwei Drittel einer Bowlingbahn sind geölt; schwarze Dreiecke dienen als Visierhilfe. Nur auf einem gekrümmten Weg erreicht der Ball den ersten Pin mit dem richtigen Einfallswinkel.

Herzinfarkt: Überraschende Erkenntnisse

Bisherige Vorstellungen über die Verkalkung von Arterien sind offenbar falsch. Neue Untersuchungen zeigen, warum Schlaganfälle und Herzinfarkte häufig so plötzlich auftreten.



Knallhartes Laserlicht

Kompakte Tischgeräte nutzen ein raffiniertes Verfahren, um Laserblitze ungeahnter Intensität zu erzeugen.



Kindesmissbrauch – Schaden für das Gehirn

Misshandlungen im zarten Kindesalter können das Gehirn in seiner Entwicklung hemmen und dauerhaft schädigen.

Weitere Themen im Juli

Massensterben durch kosmische Bomben

Die Hinweise verdichten sich, dass Einschläge von Himmelskörpern nicht nur den Untergang der Dinosaurier verursacht, sondern wiederholt große Teile des Lebens auf der Erde ausgelöscht haben. Neuestes Indiz sind Fullerene mit eingeschlossenen Edelgas-Molekülen extraterrestrischen Ursprungs.

Moderne Endoskopie

Zielgerichtet führen Chirurgen ihre Instrumente durch High-Tech-Röhren in immer neue Operationsgebiete. Den Patienten bleibt ein massiver Eingriff in den Körper erspart, der Arzt muss sich allerdings mit einem „Schlüssellochblick“ auf das Operationsgebiet begnügen. Diesen sollen Verfahren der Computergrafik wie der Tomografie erweitern.

Pluto – der Außenseiter des Sonnensystems

Als äußerster Planet zieht Pluto seine ungewöhnliche Bahn um die Sonne. Oder ist der vereiste Himmelskörper nur der sonnennächste Vertreter einer Klasse von Eisbrocken, die sich in den Außenbezirken des Planetensystems tummeln?